

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK PERFORMANSLI
MİKRO BETON TASARIMI

Burak FELEKOĞLU

Temmuz, 2009
İZMİR

YÜKSEK PERFORMANSLI MİKRO BETON TASARIMI

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı

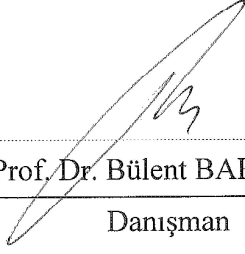
Burak FELEKOĞLU

Temmuz, 2009

İZMİR

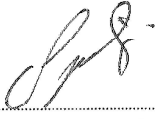
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

BURAK FELEKOĞLU tarafından **PROF. DR. BÜLENT BARADAN** yönetiminde hazırlanan “**YÜKSEK PERFORMANSLI MİKRO BETON TASARIMI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.



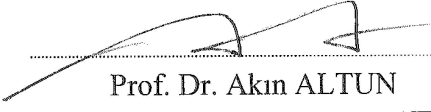
Prof. Dr. Bülent BARADAN

Danışman



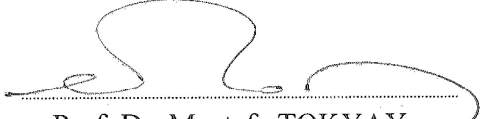
Doç. Dr. Selçuk TÜRKEL

Tez İzleme Komitesi Üyesi



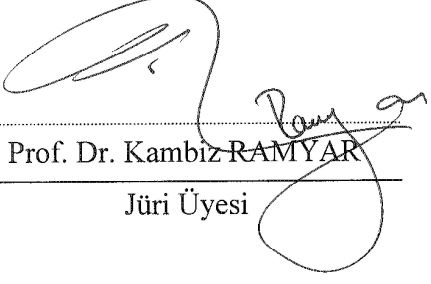
Prof. Dr. Akın ALTUN

Tez İzleme Komitesi Üyesi



Prof. Dr. Mustafa TOKYAY

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarının gelişmesinde, farklı bakış açısı, engin tecrübesi ve yol gösterici önerileriyle her zaman desteğini aldığım tez danışmanım Prof. Dr. Bülent Baradan’a, değerli fikir ve önerilerinden dolayı tez izleme komitesi üyeleri hocalarım, Doç. Dr. Selçuk Türkel ve Prof. Dr. Akın Altun’a teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarda kullanılan cihazların temininde ve yöntemlerin geliştirilmesinde 107M170 ve 108M062 no’lu projeler kapsamında sağladıkları maddi destek nedeniyle TÜBİTAK’a,

Yapı malzemesi laboratuvarındaki çalışmalarımda her zaman desteklerini aldığım mesai arkadaşlarım; Doç. Dr. Halit Yazıcı, Dr. Müh. Hüseyin Yiğiter ve Y.Müh. Serdar Aydın’a,

Reometre seçimindeki yol gösterici önerileri nedeniyle DEÜ Çevre Müh. Bölümü Öğretim Üyelerinden Doç. Dr. Azize Ayol’a ve Anton Paar Firması Temsilcisi Halim Kalkan’a,

Reolojik incelemeler sırasında elde ettiğim bulgularla ilgili değerli tartışma ve önerileri nedeniyle Dr. Nicolas Roussel’e,

Plazma modifikasyon sisteminin seçimindeki değerli tavsiyelerinden dolayı, DEÜ Tekstil Müh. Bölümü Öğretim Üyelerinden Yrd. Doç.Dr. Aysun Cireli ve Hacettepe Üniversitesi Öğretim Üyelerinden Prof. Dr. Mehmet Mutlu’ya,

Deformasyon kontrollü eğilme presinin kullanımındaki tecrübesi ve desteklerinden dolayı Yrd. Doç. Dr. Mert Yücel Yardımcıya,

Boncuk yönteminin geliştirilmesinde sağladığı teknik olanaklar ve yol gösterici önerileri dolayısıyla, Dr. Müh. Okan Önal’a,

Lazer sensörlerinin seçimi ve sistemin oluşturulmasındaki yardımlarından dolayı TDG Firması yetkilisi Sarp Dinçer, Uğur Kurd ve Mehmet Erdi Erdoğan'ya,

Polikarboksilat kökenli akışkanlaştırıcının teminindeki desteklerinden dolayı Innovatek firması yöneticisi Osman Arman'a ve Naim Ustaya, ayrıca akışkanlaştırıcının davranışı ilgili olarak verdikleri değerli bilgiler nedeniyle Prof. Dr. Levent Yüceer ve Dr. Hasan Sarıkahya'ya,

Öğütölmüş taş tozu teminindeki desteklerinden dolayı Öztüre Kireççilik San. ve Tic. A.Ş. Genel Müdürü Prof. Dr. Adnan Akyarlı'ya,

Polivinil alkol liflerin teminindeki desteklerinden dolayı Kuraray Firması yetkilisi Toshiaki Kobayashi'ye,

Tez çalışmalarının farklı aşamalarında Bitirme Projesi çalışmaları ile katkıları bulunan İnşaat Mühendisleri; Mustafa Kokkokoğlu, Hüseyin Aydoğan, Deniz Şahin, Mesut Zafer Tunç, Levent Bilcan ve Alper Tokmak'a

Her zaman ve her koşulda desteklerini esirgemeyen annem Sevinç Felekoğlu, babam Dr. Mehmet Felekoğlu'na, kardeşim Burcu'ya ve sevgili nişanlım Dr.Müh. Kamile Tosun'a,

Laboratuvarda gerçekleştirdiğim yoğun çalışmalardan sonra, yaptığı mükemmel yemeklerle, bana evde de rahat bir çalışma ortamı sağlayan anneannem Rabia Şehitler'e,

sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Burak FELEKOĞLU

Haziran, 2009

YÜKSEK PERFORMANSLI MİKRO BETON TASARIMI

ÖZ

Mikro beton, çok ince agrega kullanılarak üretilen çimento bazlı bir kompozit türüdür. Bu malzemenin tokluk performansı çeşitli liflerle geliştirilebilir. Karışım bileşenleri ve oranları uygun seçildiğinde, mikro betonun özellikle betonarme yapıların onarım ve güçlendirilmesinde kullanılma potansiyeli bulunmaktadır.

Bu tez kapsamında farklı mikro beton karışımlarının reolojik davranışları, mekanik özellikleri ve boyutsal kararlılığı incelenmiştir. Bazı tasarım parametrelerinin (mikro agrega türü, su/çimento oranı, akışkanlaştırıcı katkı dozajı, lif ilavesi vb.) mikro beton özelliklerine etkileri ayrıntılı deney yöntemleri yardımıyla araştırılmıştır.

Giriş Bölümünde bu çalışmanın her bir aşaması kısaca özetlenmiştir.

İkinci Bölüm’de öncelikle mikro beton üzerine değişik araştırmacılar tarafından yapılmış tasarımlar ışığında, farklı karışımların olası kullanım alanları incelenmiştir. Ayrıca, mikro betonun tasarım parametreleri hakkında temel bilgiler sunulmuştur.

Üçüncü Bölüm’de mikro beton üretiminde kullanılacak mikro agregaların seçimine yönelik olarak gerçekleştirilen ön deneyler sunulmuştur. Bu bölümde karışım oranlarında değişiklikler yapılarak, mikro beton kendiliğinden yerleşen hale getirilmiştir. Mikro betonun reolojik davranışını incelemek amacıyla, önce video kameralı zamana bağlı yayılma çapı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ardından uygun görülen karışımların ayrıntılı reolojik incelemeleri, bilyeli reometre yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Dördüncü Bölüm’de farklı matris ve lif kombinasyonlarında hazırlanan mikro beton karışımlarının, eğilme etkisi altındaki mekanik performansları ve tokluk değerleri incelenmiştir. Farklı liflerin yüzey özellikleri plazma uygulaması ile modifiye edilerek, mikro beton kompozitlerin eğilme yükü altındaki performansları geliştirilmiştir.

Beşinci Bölüm’de mikro beton karışımlarının aderans özelliği çekme koparma deneyleri yardımı ile incelenmiştir.

Mikro beton karışımlarının erken yaşlardaki boyutsal kararlılıkları; “Boncuk” ve “Lazer sensörler yardımıyla dokunmadan büzülme ölçme” yöntemleri ile incelenmiştir. Altıncı Bölüm’de, lif katkısının erken yaşlarda serbest büzülmeye etkisi ve liflerin kısıtlı durumda büzülme kaynaklı çatlak oluşumunu engelleme mekanizması araştırılmıştır.

Son olarak, mikro beton karışımlarında mühendislik özellikleri açısından dikkate alınması gereken kriterler yedinci bölümde özetlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikro beton, mikro agrega, reoloji, polipropilen lif, polivinil alkol lif, yüksek yoğunluklu polietilen lif, yük-sehim eğrisi, tokluk, boyutsal kararlılık.

HIGH PERFORMANCE MICRO CONCRETE DESIGN

ABSTRACT

Micro concrete is a cement based composite produced with very fine aggregate. Toughness performance of this material can be improved by incorporation of various types of fibers. A properly designed micro concrete mixture is a promising material for repairing and strengthening of reinforced concrete structures.

The design, rheological behavior, mechanical properties and dimensional stability of various micro concrete mixtures have been investigated within the scope of this thesis. The effects of different design parameters (micro aggregate type, water/cement ratio, admixture dosage, fiber addition, etc.) on performance of various micro concrete mixtures have been determined by sophisticated tests.

Each stage of this research have been summarized in the introduction chapter.

The properties and application possibilities of various micro concrete mixtures developed by different researchers have been examined in the second chapter. Also fundamentals of design parameters of micro concrete are presented in this chapter.

In the third chapter, preliminary test results are presented for the purpose of choosing proper type of micro aggregate. Also, micro concrete mixtures have been modified to gain self-compacting properties in order to improve the workability of the composites in this stage. Rheological behaviors of the mixtures have been determined by time-dependent spread measurements via camera recording system. Additional sophisticated rheological investigations were conducted by using a rheometer equipped with a ball measuring system.

The flexural performance and toughness properties of various composites with different matrix and fiber combinations have been determined in the fourth stage of this research. The surface properties of different types of fibers have been modified by proper plasma applications in order to improve flexural toughness properties of the composites.

In the fifth chapter, the adhesion properties of some selected mixtures were determined by pull-off tests.

Early age dimensional stability of micro concrete mixtures were investigated by the developed “Bead” and “Non-contact shrinkage measurements by laser sensors” methods. The effects of fiber inclusion on early-age shrinkage and crack prevention mechanism in restrained conditions have also been investigated in sixth chapter.

Finally, the design criteria based on aimed engineering properties were summarized in the seventh chapter.

Keywords: Micro concrete, micro aggregate, rheology, polypropylene fibers, polyvinyl alcohol fibers, high density polyethylene fibers, load-deflection curve, toughness, dimensional stability.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	v
ABSTRACT	vii

BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
--------------------------------	----------

BÖLÜM İKİ - LİTERATÜR BİLGİLERİ	6
--	----------

2.1 Mikro Beton (Tanım, Tasarım Kriterleri ve Uygulama Alanları)	6
2.1.1 Tanım ve Tasarım Kriterleri	6
2.1.2 Potansiyel Avantaj ve Dezavantajları, Kullanım Alanları	10
2.2 Mikro Beton Tasarımında Matris Bileşenlerinin Genel Performansa Etkisi ...	28
2.2.1 Su/bağlayıcı Oranı - Akışkanlaştırıcı Katkı Dengesi	28
2.2.2 Mikro Agregaların, Bağlayıcıların Türü ve Karışımındaki Oranları	29
2.2.3 Mikro Agreg ve Bağlayıcıların Fiziksel Özellikleri	31
2.2.3.1 Mikro Agregaların Tane Boyutu Karakterizasyonu	32
2.2.3.2 Agreg Boyutunun Küçültülmesinin Islatma Suyu İhtiyacına Etkisi	34
2.2.3.3 Agreg Boyutu - Birim Yüzey için Gerekli Hamur Hacmi İlişkisi	34
2.2.3.4 Agreg Boyutunun Küçültülmesinin Heterojenliği Azaltması	35
2.3 Taze Çimento Hamuru ve Harç Reolojisi	37
2.3.1 Akışkan Reolojisi, Genel Tanımlar ve Ölçüm Yöntemleri	37
2.3.2 Katı Tanecik İçeren Süspansiyonların Reolojik Davranışları	44
2.3.3 Çimento Hamuru ve Harç Reolojisi Karakterizasyonu	57
2.3.3.1 Çimento Hamuru ve Harçta Reolojik Parametrelerin Dolaylı Yollardan Ölçümüne Yönelik Çalışmalar	58
2.4 Çimento Bazlı Kompozitlerde Tokluk Özelliklerini Geliştirmeye Yönelik Çalışmalar	61

2.4.1 Çimento Bazlı Kompozitlerde Gerilme Kaynakları ve Çatlak Hassasiyeti	62
2.4.2 Çimento Bazlı Kompozitlerde Kullanılan Liflerin Özellikleri	64
2.4.3 Çimento Bazlı Lifli Kompozitlerin Tokluk Özellikleri	70
2.4.4 Çimento Bazlı Kompozitlerde Çoklu Çatlak Davranışı	72
2.4.4.1 Giriş	72
2.4.4.2 Çoklu Çatlak ve Deformasyon Sertleşmesi Davranışının Modellemesi ..	73
2.5 Çimento Bazlı Kompozitlerde Büzülme	82
2.5.1 Büzülme Mekanizmaları	83
2.5.1.1 Plastik Büzülme	83
2.5.1.2 Otojen (Bünyesel) Büzülme	84
2.5.1.3 Kuruma Büzülmesi (Hidrolik Büzülme)	92
2.5.1.3.1 Kuruma Büzülmesini Azaltmaya Yönelik Mineral Katkıların Kullanımı	96
2.5.1.3.2 Kuruma Büzülmesini Azaltmaya Yönelik Büzülme Azaltıcı Kimyasal Katkıların Kullanımı	97
2.5.1.3.3 Kuruma Büzülmesini Azaltmaya Yönelik Genleşen Karakterde Ürün Oluşturan Katkıların Kullanımı	98
2.5.1.4 Termik Büzülme	99
2.5.1.5 Karbonatlaşma Büzülmesi	99
2.5.2 Çimento Bazlı Kompozitlerde Büzülme Miktarının Ölçümü	100
2.5.2.1 Uzun Süreli Yöntemler	100
2.5.2.2 Kısa Süreli Yöntemler	102

BÖLÜM ÜÇ - MİKRO AGREGA KARAKTERİZASYONU VE MİKRO BETONUN REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ106

3.1 Mikro Agrega Özelliklerinin İncelenmesi ve Mikro Betonda Performans Karşılaştırmaları	106
3.1.1 Kullanılan Malzemeler	107
3.1.2 Mikro Agregaların Hazırlanması ve Tane Boyut Dağılımları	108
3.1.3 Mikro Agregaların Tane Şekli ve Yüzey Morfolojileri	110

3.1.4 Mikro Beton Karışımlarının Hazırlanması	118
3.1.5 Mikro Betonların Katkı İhtiyacı ve Mekanik Özellikleri	118
3.1.6 Sonuçlar ve Değerlendirme	121
3.2 Kendiliğinden Yerleşen Mikro Beton Tasarımına Yönelik Ön Çalışmalar ve Tiksotropi Kaynaklı Kaynaşma Problemi	124
3.3 Mikro Betonun Reolojik Karakterizasyonu	129
3.3.1 Mikro Betonların Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Deney Yöntemi	129
3.3.2 Video Kayıtları Kullanılarak İncelenen Karışımlar	132
3.3.3 Video Görüntülerinden Elde Edilen Deney Sonuçları	134
3.3.4 Sonuçlar ve Değerlendirme	140
3.4 Reometre Kullanılarak Yapılan Deneysel Çalışmalar	142
3.4.1 Reolojik İncelemeler için Hazırlanan Karışımlar	143
3.4.2 Mikro Betonların Hazırlanması	146
3.4.3 Reolojik Özelliklerin Ölçümünde Kullanılan Reometre Sistemi	147
3.4.4 Reolojik İncelemelerde Kullanılan Yöntemler	150
3.4.5 Statik Reolojik Parametrelerin Belirlenmesi	151
3.4.5.1 Statik Eşik Kayma Gerilmesi (EKG)	151
3.4.5.2 Başlangıç Viskozitesi	155
3.4.5.3 Statik Reolojik Parametrelerin Birlikte Değerlendirilmesi	159
3.4.6 Akma Eğrilerinin Belirlenmesi	159
3.4.6.1 Akma Eğrisinin Oluşturulmasında Kullanılan Yöntem	159
3.4.6.2 Ham Verilerin Toplanması ile İlgili Temel Bilgiler	162
3.4.6.3 Ham Verilerinin İşlenmesi ve Reolojik Modelleme	163
3.4.6.4 Dinamik Reolojik Parametrelerin Akma Eğrisi Yardımıyla Tespiti	165
3.4.6.4.1 Çimento Hamuru Serisi	165
3.4.6.4.2 Lifsiz Mikro Beton Serisi	171
3.4.6.4.3 Lifli Mikro Beton Serisi	178
3.4.6.4.4 Çimento Harcı Serisi	183
3.4.6.4.5 Tüm Serilerin Birlikte Değerlendirilmesi	186
3.4.7 Akma Eğrileri Yardımı ile Histeresiz Alanlarının Tespiti	190

3.4.8 Sabit Deformasyon Hızında Viskozitenin Zamana Bağlı Değişiminin İncelenmesi (Tiksotropi)	196
3.4.8.1 Birinci Yöntemin Uygulanması ve Sonuçların Değerlendirilmesi	198
3.4.8.2 İkinci Yöntemin Uygulanması ve Sonuçların Değerlendirilmesi ..	207
3.4.9 Reolojik Karakterizasyonla İlgili Sonuçlar ve Genel Değerlendirme	210
3.4.9.1 Statik Reolojik Parametrelerle İlgili Sonuçlar	211
3.4.9.2 Dinamik Reolojik Parametrelerle İlgili Sonuçlar	212
3.4.9.3 Histeresiz Alanları ile İlgili Sonuçlar	214
3.4.9.4 Sabit Deformasyon Hızında Zamana Bağlı Viskozite Değişimi ile İlgili Sonuçlar	215

BÖLÜM DÖRT - MİKRO BETONUN TOKLUĞUNUN ve ÇOKLU ÇATLAK PERFORMANSININ GELİŞTİRİLMESİNE YÖNELİK ÇALIŞMALAR216

4.1 Mikro Beton Karışımlarında Kullanılan Malzemeler	217
4.1.1 Çimento	217
4.1.2 Mikro Agregalar	217
4.1.3 Uçucu kül	218
4.1.4 Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı	219
4.1.5 Standart Kum	219
4.1.6 Polimer Kökenli Lifler	220
4.2 Matris-Lif Kombinasyonlarının Yük-Sehim Eğrisine Etkisinin İncelenmesi	224
4.2.1 Yük-Sehim Eğrilerinin Değerlendirilmesi ve Tartışma.....	228
4.2.2 Birinci Aşama Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçlar.....	241
4.3 Matris–Lif Kombinasyonlarının Yük-Sehim Eğrisine Etkisinin Farklı Örnek Şekillerinde Karşılaştırılması (Mini Plaka Deneyleri)	242
4.3.1 Mini Plaka Örneklerinin Hazırlanması	243
4.3.2 Örneklerin Yükleme Koşulları ve Yük-Sehim Eğrileri	243
4.4 Seçilen Matris–Lif Kombinasyonlarının Ayrıntılı Yük-Sehim Eğrisi İncelemeleri	250
4.4.1 İncelenen Karışımlar ve Örneklerin Hazırlanması	251
4.4.2 Yük-Sehim Grafiklerine Lif İlavesinin Etkisi	255

4.4.3 Kompozitlere Ön Yükleme Uygulamanın Yük-Sehim Grafiklerine Etkisi ..	263
4.4.4 Ön Yükleme Uygulanmış ve Uygulanmamış Mikro Betonların Mekanik Performansının Karşılaştırılması	265
4.4.5 Mikro Beton Karışımlarının Diğer Özelliklerinin İncelenmesi	270
4.4.6 Yük-Sehim Eğrisi Karakterizasyonu Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar	272
4.5 Mikro Beton Kompozitlerin Tokluk Performansını Arttırmaya Yönelik Olarak Lif Yüzeyinin Soğuk Plazma Yöntemi ile Modifikasyonu	274
4.5.1 Polimer Yüzeylerin Plazma ile Modifikasyonu	274
4.5.2 Plazma Modifikasyonu ile İlgili Deneysel Çalışmalar	278
4.5.2.1 Amaç, Kapsam ve Yöntem	278
4.5.2.2 Polipropilen (PP) Liflerde Plazma Modifikasyonunun Kompozit Performansına Etkileri	280
4.5.2.2.1 Argon Plazması Uygulanan PP Lifli Kompozitlerin Performansı	281
4.5.2.2.2 Oksijen Plazması Uygulanan PP Lifli Kompozitlerin Performansı	283
4.5.2.2.3 Argon ve Oksijen Plazması Uygulanan PP Lifli Kompozitlerin Performanslarının Birlikte Değerlendirilmesi	284
4.5.2.3 Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE) Liflerde Plazma Modifikasyonunun Kompozit Performansına Etkileri	287
4.5.2.3.1 Argon Plazması Uygulanan YYPE Lifli Kompozitlerin Performansı	288
4.5.2.3.2 Oksijen Plazması Uygulanan YYPE Lifli Kompozitlerin Performansı	288
4.5.2.3.3 Argon ve Oksijen Plazması Uygulanan YYPE Lifli Kompozitlerin Performanslarının Birlikte Değerlendirilmesi	290
4.5.2.4 Plazma Uygulaması Sonrasında Yağlanan Polivinil Alkol (PVA) Liflerin Kompozit Performansına Etkileri	294
4.5.2.4.1 Argon ve Oksijen Plazması Sonrası Yağlanan PVA Lifli Kompozitlerin Performanslarının Karşılaştırılması	295
4.5.3 Üçüncü Aşama Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçlar	299

BÖLÜM BEŞ - MİKRO BETON TASARIMLARININ BETON YÜZEYLERE ADERANSI İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR302

5.1 Taban Betonu Örneklerinin Hazırlanması	302
5.2 Aderans Örneklerinin Hazırlanması ve Beton Yüzeylere Uygulanması	305
5.3 Aderans Deneylerinin Yapılışı	308
5.4 Deney Sonuçları ve Bulguların Yorumlanması	310
5.4.1 Kendiliğinden Yerleşebilirliğin Çekme Koparma Performansını Arttırması	313
5.4.2 Liflerin Çekme Koparma Performansını Artırıcı Etkisi	317
5.4.3 Sonuçlar ve Değerlendirme	319

BÖLÜM ALTI - MİKRO BETONUN BOYUTSAL KARARLILIĞI320

6.1 Erken Yaşlardaki ve Uzun Vadeli Şekil Değişimi Ölçümüne Yönelik Çalışmalar (I. Aşama, Boncuk Yöntemi)	321
6.1.1 Boncuk Yöntemi ve Hazırlanan Örnekler	322
6.1.2 Boncuk Yöntemi Ölçüm Sonuçları ve Değerlendirme	325
6.1.3 Uzun Vadeli Kuruma Büzülmesi Ölçüm Sonuçları ve Değerlendirme	330
6.1.4 Sonuçlar, Genel Değerlendirme ve Öneriler	331
6.2 Erken Yaşlardaki Şekil Değişimini Lazer Sensörlerle Ölçmeye Yönelik Çalışmalar (II. Aşama)	332
6.2.1 Mikro Beton ve Standart Harçların Hazırlanmasında Kullanılan Malzemeler	333
6.2.2 Mikro Beton Tasarımları ve Karışımların Hazırlanması	333
6.2.3 Taze Örneğe Temas Ederek Ölçüm Yapan Düşük Yay Kuvvetli Komparatör Deneyleri	334
6.2.4 Taze Örneğe Temas Etmeden Ölçüm Yapan Lazer Sensörlerin Kullanımı	335
6.2.4.1 Literatürdeki Mevcut Yöntemlerin Çalışma Prensipleri	336
6.2.4.2 Geliştirilen Yöntem ve Mevcut Yöntemlerden Farklılıkları	338
6.2.4.3 Sensörlerin Yazılıma Tanıtımı ve Kalibrasyonları	338

6.2.4.4 Kalıp Sistemi	340
6.2.5 Standart Harç Örnekleri için Uygulanan Ölçüm Yöntemi	342
6.2.5.1 Priz Süresi ve Oturma Ölçümleri	342
6.2.5.2 Boy Değişimi Ölçümleri	344
6.2.5.2.1 “A” grubu ölçüm sonuçları	345
6.2.5.2.2 “B” grubu ölçüm sonuçları	346
6.2.5.2.3 “C” grubu ölçüm sonuçları	346
6.2.5.3 Çimento Harçlarından Elde Edilen Sonuçların Genel Değerlendirmesi	348
6.2.6 Çimento Hamuru Örnekleri için Uygulanan Ölçüm Yöntemi ve Sonuçlar	349
6.2.7 Mikro Beton Örnekleri için Uygulanan Ölçüm Yöntemi ve Sonuçlar	351
6.2.8 Lifli Mikro Beton Örnekleri için Uygulanan Ölçüm Yöntemi ve Sonuçlar	356
6.2.9 Uçucu Küllü MII Matrisi ile Hazırlanan Mikro Beton Örnekleri için Uygulanan Ölçüm Yöntemi ve Sonuçlar	358
6.2.10 Mikro Betona Polimer Katkısı İlavesinin Büzülmeye Etkisi	359
6.2.11 Mikro Beton ve Standart Harç Örneklerinin Otojen Büzülme Potansiyelinin Deneysel Olarak Tespiti (Parafin Uygulaması)	360
6.2.12 Yöntemin Genel Olarak Değerlendirilmesi	362
6.2.12.1 Yöntemin Avantajları	363
6.2.12.2 Yöntemin Dezavantajları	363
6.3 Mikro Betonun Kısıtlı Durumda Büzülme Çatlağı Hassasiyeti ve Sonuçlar	364

BÖLÜM YEDİ - MİKRO BETON TASARIM KRİTERLERİ, SONUÇLAR ve GENEL DEĞERLENDİRME366

7.1 Mikro Beton Tasarımında Reolojik Performans Kriterleri	366
7.2 Mikro Beton Tasarımında Eğilme Etkisi Altındaki Performans Kriterleri ...	371
7.3 Mikro Beton Tasarımında Boyutsal Stabilite Açısından Liflerin Önemi	373
7.4 Performans İncelemelerinde Kullanılan Deney Yöntemlerinin Avantaj ve Dezavantajları	375

7.4.1 Video Kameralı Yayılma Çapı Gelişimi Ölçümü	375
7.4.2 Bilyeli Reometre	375
7.4.3 Mini Plaka Yöntemi	377
7.4.4 Boncuk Yöntemi	378
7.4.5 Lazer Sensörlü Büzülme Ölçüm Yöntemi	378
7.5 Yüksek Performanslı Mikro Beton Karışımlarının Olası Kullanım Alanları	379
7.6 Gelecek Çalışmalara Yönelik Öneriler	379
KAYNAKLAR	381
EKLER	415

BÖLÜM BİR

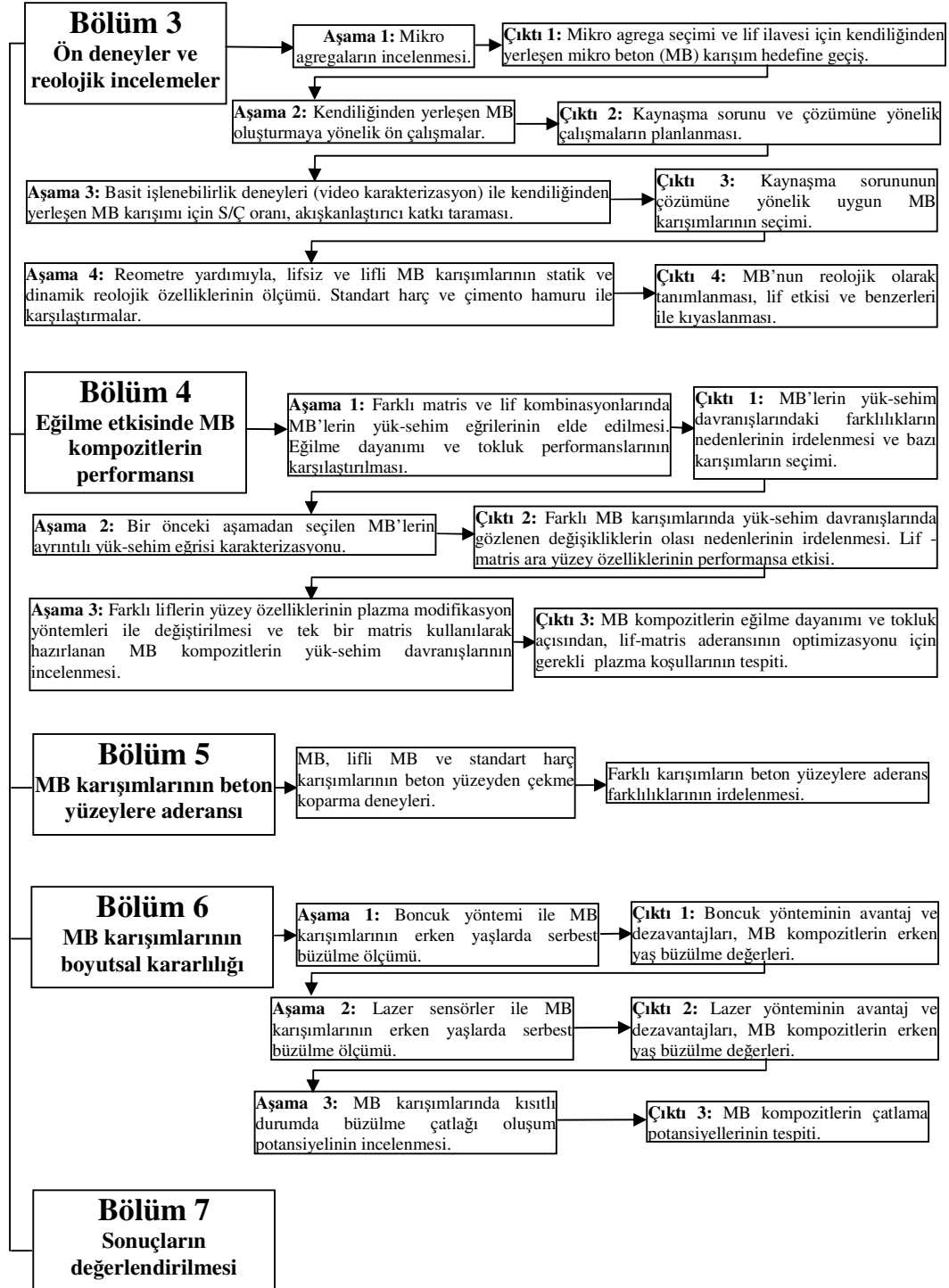
GİRİŞ

Mikro beton en büyük agrega tane boyutu çimento inceliği seviyesine indirgenmiş ve çeşitli liflerle tokluk özellikleri iyileştirilmiş, çimento bazlı bir kompozit malzeme türüdür. Mikro betonun karışım bileşenleri ve oranları uygun seçildiğinde, özellikle betonarme yapıların onarım ve güçlendirilmesinde kullanılması mümkündür. Aynı zamanda plaka formunda prefabrik yapı elemanı üretiminde kullanılabilecek bir potansiyele sahiptir. Çimento bazlı kompozitlerde gözlenen tipik gevrek davranış, özellikle lif katkılı mikro betonlarda büyük ölçüde azaltılabilmektedir.

Bu çalışmanın amacı öncelikle reolojik açıdan kolay hazırlanabilir ve kullanılabilir mikro beton karışımları geliştirmektir. Aynı zamanda tokluk özellikleri açısından yüksek performanslı bir kompozit malzemenin üretilmesi hedeflenmiştir. Tez kapsamında farklı mikro beton karışımlarının reolojik davranışları, mekanik özellikleri ve boyutsal kararlılığı incelenmiştir. Söz konusu özelliklerin geliştirilmesine yönelik araştırmalar sunulmuş ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Farklı tasarım parametrelerinin (mikro agrega türü, su/çimento oranı, akışkanlaştırıcı katkı dozajı, lif ilavesi vb.) mikro betonun performansına etkileri araştırılmış, hedefe yönelik performans kriterleri ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bu bağlamda incelenen parametreler;

- Mikro betonun matris bileşenlerinin karakterizasyonu ve bileşenlerin mikro betonun mekanik özelliklerine etkilerinin tespiti,
- Mikro betonun reolojik karakterizasyonu ve amaçlanan işlenebilirlik özelliğine göre istenen reolojik davranışı belirlenmesi,
- Mikro betonun eğilme etkisi altında mekanik özelliklerinin ve tokluğunun belirlenmesi,
- Gevrek davranışın azaltılmasına yönelik önlemlerin araştırılması,
- Mikro betonda büzülme potansiyelinin belirlenmesi ve büzülme çatlağı oluşumu hassasiyetini azaltmaya yönelik önlemlerin araştırılması,

olarak sıralanabilir. Şekil 1.1’de sunulan akış şemasından *deneysel çalışmaların* aşamaları ve elde edilen çıktıların sonraki aşamalarla ilişkisi izlenebilir.



Şekil 1.1 Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar.

Deneyisel çalışmalar sonucu elde edilen, aşağıda kapsamaları kısaca özetlenen bulgular ve araştırma sonuçları, ilgili bölümlerde detaylı şekilde sunulmuştur:

İkinci Bölüm'de öncelikle “*mikro beton*” tanımı yapılmış ve literatürdeki benzer tasarımlarla daha önce yapılan çalışmalar ışığında, mikro betonun olası kullanım alanları incelenmiştir. Literatür taraması şeklindeki bu bölümde, tez kapsamında ağırlıklı olarak ele alınacak özellikler hakkında temel bilgiler ve güncel araştırma sonuçları sunulmuştur. Söz konusu özellikler “*çimento esaslı kompozitlerin reolojik davranışları, eğilme etkisi altında mekanik performansları ve boyutsal kararlılıkları*” ile ilgili üç ana başlıkta incelenmiştir. Mikro beton tasarımının reolojik, mekanik ve boyutsal kararlılık açısından performans kriterleri tartışılmıştır.

Üçüncü Bölüm'den itibaren tez kapsamında yapılan deneyisel çalışmalar sunulmaktadır. **Üçüncü Bölüm**'de mikro beton üretiminde kullanılacak bağlayıcı olmayan “*toz malzemenin karakterizasyonuna ve seçimine yönelik ön deneyler*” gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla farklı incelikteki kireçtaşı ve kuvars kökenli malzemelerin, kompozitin mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Agrega yerine kullanılacak toz malzeme olarak, yaklaşık çimento inceliğinde kireçtaşı tozu seçilmiştir. Ancak ilerleyen aşamalarda bazı bölümlerde karşılaştırma amacıyla kuvars tozu da zaman zaman kullanılmıştır.

Ön deneylerle seçilen mikro beton tasarımının kıvam özellikleri, karışım oranlarında değişiklikler yapılarak kendiliğinden yerleşen hale getirilmiştir. Kendiliğinden yerleşen mikro beton tasarımlarında zaman zaman gözlenen “*kaynaşma sorununu azaltmaya yönelik öneriler*”de bulunulmuştur.

Mikro betonun reolojik karakterizasyonu amacıyla, önce “*video kameralı zamana bağlı yayılma çapı ölçümleri*” ile farklı karışımlar incelenmiştir. Ardından uygun görülen karışımların ayrıntılı reolojik incelemeleri “*bilyeli reometre*” yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar çeşitli çimento hamuru ve çimento harcı karışımları ile karşılaştırılarak farklılıklar ortaya konulmuştur. Bu aşamada lifli mikro betonların performansları da değerlendirilmiştir.

Dördüncü Bölüm'de mikro betonların mekanik performansları üç aşamalı bir deney programı ile incelenmiştir. İlk aşamada farklı matris ve lif kombinasyonlarında hazırlanan mikro beton karışımlarının, *“eğilme etkisi altındaki mekanik performansları ve tokluk değerleri”* lifsiz mikro betonlarla kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Lif tipinin ve dozajının taze mikro beton işlenebilirliğine ve mekanik performansına etkileri tartışılmıştır. Seçilen bazı karışımlar ile farklı geometrilerdeki örnekler hazırlanarak, örnek şeklinin yük-sehim eğrilerini nasıl etkilediği araştırılmıştır. İkinci aşamada mikro beton kompozitlerin *“ön yüklemmeden etkilenme derecelerinin lifli ve lifsiz olma durumlarında nasıl değiştiği”* araştırılmıştır. Ayrıca seçilen karışımların diğer fiziksel ve mekanik özellikleri bu aşamada incelenmiştir. Son aşamada ise farklı liflerin yüzey özellikleri *“plazma uygulaması ile modifiye edilerek”* mikro beton kompozitlerin eğilme yükü altındaki performanslarında meydana gelen değişiklikler karşılaştırmalı deneylerle ortaya konulmuştur.

Beşinci Bölüm'de mikro beton karışımlarının onarım ve güçlendirme uygulamalarında kullanılması halinde, beton yüzeylere aderansının nasıl olacağı *“çekme koparma deneyleri”* yardımı ile incelenmiştir. Mikro betonun tamir ve onarım uygulamalarında kullanılabilirliği tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlar yardımıyla kendiliğinden yerleşen ve lif katkılı mikro betonların yüksek performanslarının olası nedenleri yorumlanmıştır.

Altıncı Bölüm'de mikro beton karışımlarının özellikle erken yaş boyutsal kararlılığını incelemeye yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda iki farklı yöntem geliştirilmiştir. *“Boncuk yöntemi”*nin ve *“Lazer sensörler yardımıyla zamana bağlı büzülmeyi dokunmadan ölçme yöntemi”*nin avantaj ve dezavantajları ortaya konulduktan sonra, söz konusu yöntemlerle çimento harcı ve farklı mikro beton karışımlarının erken yaşlarda büzülme miktarları ölçülmüştür. Mikro betonun erken yaş boyutsal kararlılığının geliştirilmesine yönelik alternatif yöntemler sunulmuştur. Lif katkısının erken yaşlarda ve uzun vadeli serbest büzülmeye etkisi incelendikten sonra, liflerin kısıtlı durumda *“büzülme kaynaklı çatlak oluşumunu engelleme mekanizması”* tartışılmıştır.

Yedinci Bölüm'de deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ışığında genel bir değerlendirme yapılarak, “*mikro beton karışımının hazırlanmasında dikkate alınması gereken kriterler*” verilmiştir. Hedefe yönelik olarak, mikro betonun reolojik özelliklerinin ve tokluk performansının geliştirilmesi amacıyla, karışımda yapılabilecek değişikliklerin olası etkileri yorumlanmıştır. Ayrıca performans incelemelerinde kullanılan deney yöntemlerinin avantaj-dezavantajları sıralanmıştır.

BÖLÜM İKİ

LİTERATÜR BİLGİLERİ

Bu bölümde öncelikle mikro beton hakkında genel bilgiler verilecek, performans kriterleri ve olası kullanım alanları üzerine yapılan çalışmalar sunulacaktır. Mikro betonun agrega fazını oluşturan toz malzemelerin (mikro agrega) mikro beton performansına etkileri ve bu malzemelerin karakterizasyonuna yönelik literatür bilgisi sunulacaktır. Ayrıca tez kapsamında mikro betonların taze haldeki davranışları üzerine de yoğunlaşılacağından, taze çimento hamuru ve harç reolojisi üzerine yapılan çalışmalar incelenecektir. Bu bölümün sonunda, mikro betonların mekanik özellikleri, tokluk performansları ve boyutsal kararlılık özellikleri ile ilgili literatür bilgisi sunulacaktır.

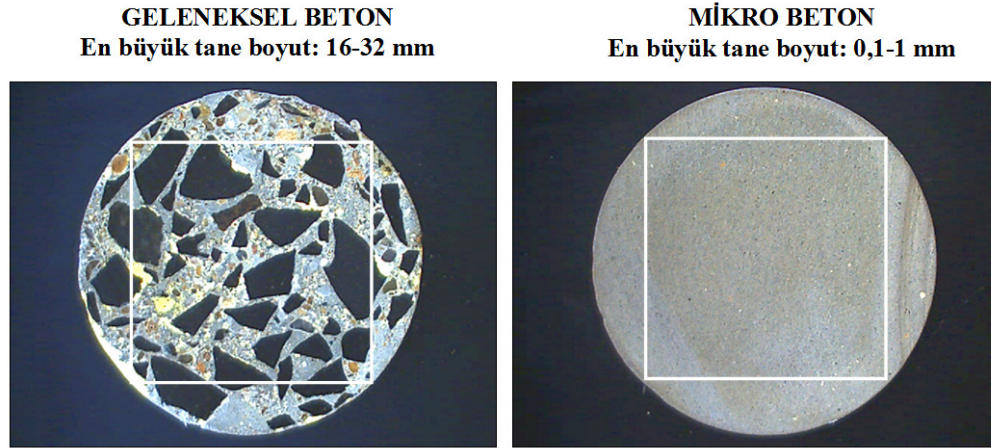
2.1 Mikro Beton (Tanım, Tasarım Kriterleri ve Uygulama Alanları)

2.1.1 Tanım ve Tasarım Kriterleri

Mikro beton (MB) en büyük tane boyutu 0,1-1 mm arasında değişen farklı türde toz malzemelerle (mikro agrega) hazırlanan özel bir beton türüdür (Şekil 2.1). Aslında beton, tanımı gereği bünyesinde, çimento, su, ince agrega ve iri agrega bulunduran kompozit bir yapı malzemesidir. Ancak MB’de iri agrega ve ince agrega fazı sistemden çıkartılmış, bunların yerini ince öğütülmüş inert veya puzolanik malzemeler almıştır. Bu değişiklik, gerek taze halde reolojik davranış ve gerekse sertleşmiş halde mekanik özellikler bakımından klasik betona kıyasla farklılıkları beraberinde getirmektedir. Taze halde hedef kıvamın sağlanması için çoğunlukla bir akışkanlaştırıcı katkı maddesi de mikro beton tasarımında kullanılır. Aslında bünyesinde ince agrega bile barındırmayan bu tür bir kompozite “beton” adını vermek doğru değildir. Ancak “mikro beton” terimi tane boyutunu da tanımlamakta olduğu için, bu tez kapsamında kullanılmıştır.

Mikro beton terimi, 1960-70’li yıllarda ilk olarak betonarme yapıların küçük ölçekli olarak modellenmesi amacıyla hazırlanan iri agrega içermeyen karışımlar için

kullanılmıştır (Litle ve Paparoni, 1966, Aldridge ve Breen, 1970). Günümüzde de özellikle çimento bazlı kompozitlerde yükleme etkisi altında oluşan çatlakların (Ruinz, 2001, Yu ve Ruinz, 2006, Toumi, Bascoul, Turatsinze, 1998, Tsembelis ve Proud, 2006) ve kuruma etkisi ile meydana gelen çatlakların incelenmesinde (Colina ve Acker, 2000, Shah, Weiss ve Young, 1997) kullanılan bir model malzemesidir. Ayrıca tamir amaçlı uygulama alanlarında, farklı mikro beton tasarımları kullanılmaktadır (Norumu ve Chaudhary, 1999, Jumaat, Kabir Obeydullah, 2006, Dhir ve Jones, 1996). Çeşitli kalıplama yöntemleri ile panel eleman üretimlerinde kullanılan ve patentleri alınan mikro beton ürünleri mevcuttur (Matute ve Arturo, 2006).



Şekil 2.1 Geleneksel beton ve mikro beton kompozitlerin kesit görüntüleri.

Mikro beton bünyesinde iri agrega barındırmadığı için betona kıyasla çok daha gevrek yapıda bir kompozittir. Aynı zamanda büzülme hassasiyeti klasik betona kıyasla çok daha fazladır. Mikro betonun tokluğu, matrise lif ilavesi ile arttırılmaktadır. Literatürde çeşitli polimerik liflerin kullanımı ile tokluk özellikleri geliştirilen çimento bazlı kompozitler “*mühendislik özellikleri geliştirilmiş çimento bazlı kompozitler - Engineered Cementitious Composites (ECC)*” olarak adlandırılmaktadır. Bu konuda özellikle Amerika’da Victor Li öncülüğünde son 10 yıldır çok yoğun araştırmalar yapılmaktadır (Li ve Kanda, 1998, Li, 2003a, 2006, Kanda ve Li, 2006, Keoleian ve diğer., 2006). ECC, geleneksel betona kıyasla çok daha yüksek tokluğa sahiptir. Ayrıca çekme ve eğilme gerilmeleri altında deformasyon kapasitesi yüksek bir kompozittir. Literatürde çekme birim

deformasyon kapasitesi %2,5-4'e kadar çıkan ECC'ler rapor edilmiştir (Li ve Kanda, 1998). Her mikro beton tasarımı ECC olarak değerlendirilemezken, her ECC, mikro betonun özel bir türü olarak kabul edilebilir.

Geleneksel betondan çok daha farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olan mikro betonun tasarımında dört temel kriter dikkate alınmalıdır. Tez kapsamında edinilen bilgiler ile bu kriterler Şekil 2.2'de özetlenerek şematize edilmiştir. Hedeflenen performans kriterine göre tasarım yönü değiştiğinden, tasarım için tek bir çözüm bulunmamakta, çözüm önerileri iç içe geçmektedir. Aşağıda bu öneriler sıralanmıştır:

1. *Amaçlanan işlenebilirlik özelliğine göre istenen reolojik davranışı gösterebilme:* Mikro betonun kullanım alanına göre farklı reolojik özellikler göstermesi istenebilir. Örneğin, kendiliğinden yerleşebilme, vibrasyonla yerleşme veya püskürtme yoluyla yerleştirme durumlarında, tasarımdan istenen reolojik davranış farklılık göstermektedir. Hedeflenen özelliğin sağlanması için aşağıdaki yöntemler uygulanabilir:

- Akışkanlaştırıcı katkı – su/çimento (S/Ç) oranı dengesini sağlama,
- Farklı kimyasal ve mineral katkıların kullanımı ile istenen amaca ulaşma (priz hızlandırıcı, kıvam arttırıcı vb.).

2. *Matris bileşenleri açısından istenen boşluk yapısı ve dayanım sınıfını sağlama:* Matrisi oluşturan bağlayıcı ve bağlayıcı olmayan malzemelerin türü, fiziksel özellikleri, kullanım oranları üretilecek kompozitin boşluk yapısını ve dayanım sınıfını doğrudan etkilemektedir. Örneğin; mikro agreganın türü, boyut dağılımı, şekil ve yüzey özellikleri performansı etkileyebilen parametrelerdir. Aşağıdaki yöntemlerle, boşluk yapısı ve dayanım sınıfı optimizasyonuna gidilebilir:

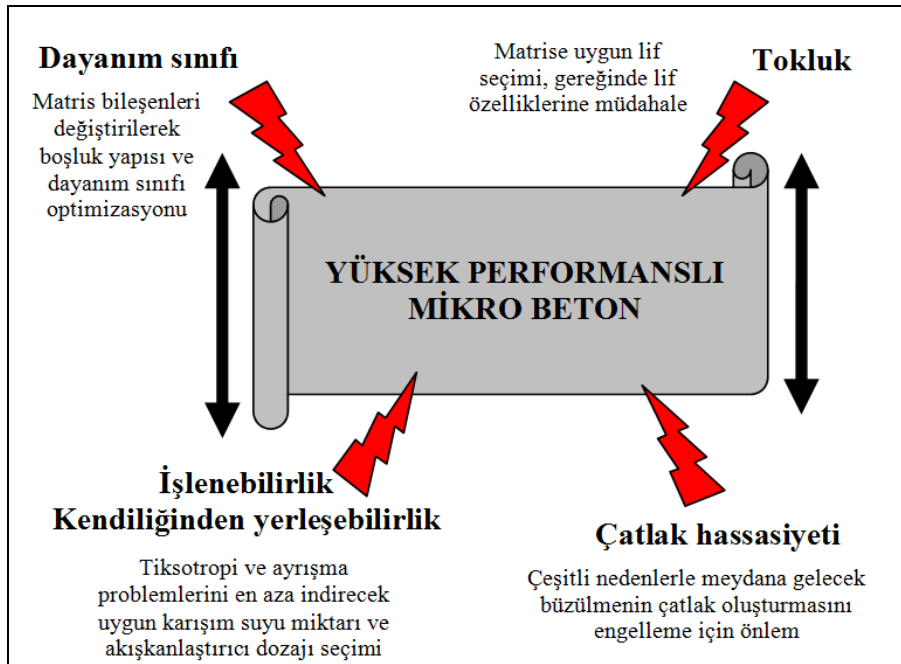
- Mikro agreganın karakterizasyonu,
- Matris bileşenleri arasındaki oranların değiştirilmesi,
- Seçilen matriste akışkanlaştırıcı katkı – S/Ç oranı dengesini sağlama.

3. *Mikro betonun gevrek (kırılgan) davranışını azaltma*: Mikro betonda çatlak oluşum mekanizmasını değiştirerek tokluk performansının artırılması hedeflenmelidir. Bu kapsamda en etkili yöntemler aşağıda sıralanmıştır:

- Mikro lif kullanımı,
- Mikro lifli matrisin reolojik özelliklerinin geliştirilmesi.

4. *Mikro betonda büzülme çatlak oluşumu hassasiyetini azaltma*: Büzülme davranışı açısından hassas olan mikro betonun bu özelliği, aşağıdaki yöntemler kullanılarak azaltılabilir:

- Çeşitli büzülme engelleyici kimyasalların kullanımı,
- Genleşen karakterde ürün oluşturan maddelerin kullanımı,
- Kısıtlı durumda çatlak yayma ve genişliğini kısıtlama özelliği olan liflerin kullanımı,
- Kür koşullarının çatlak oluşumunu azaltıcı şekilde değiştirilmesi.



Şekil 2.2 Yüksek performanslı mikro beton tasarımı için temel kriterler.

2.1.2 Potansiyel Avantaj ve Dezavantajları, Kullanım Alanları

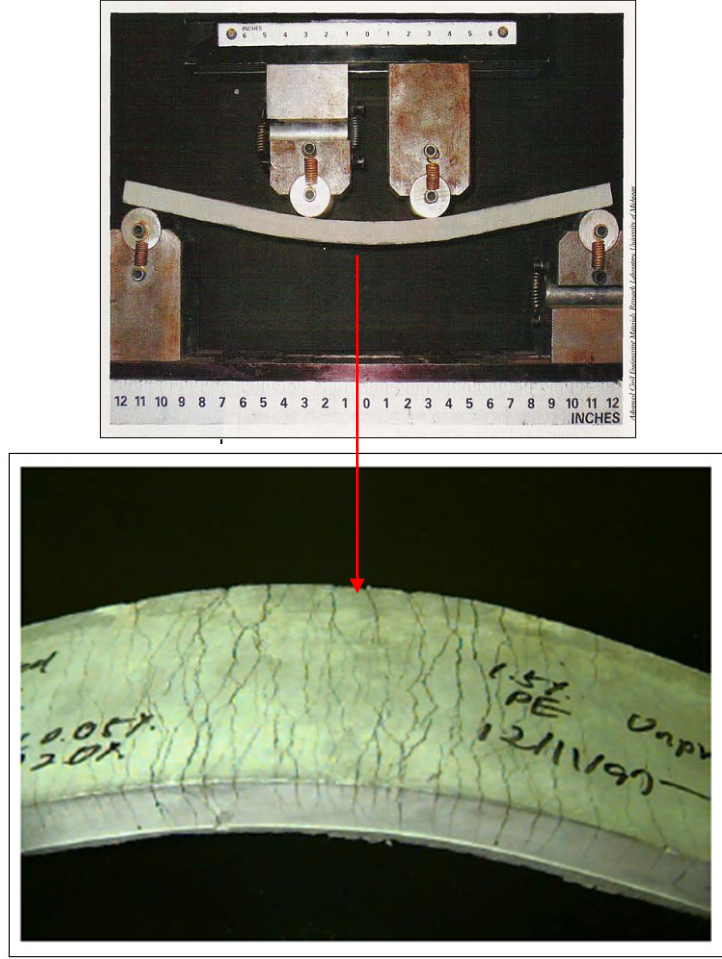
Yüksek performanslı mikro beton tasarımlarının avantajları ve potansiyel uygulama alanları, literatürden örnekler sunularak aşağıda sıralanmıştır:

1. Uygun parçacık tane boyut dağılımı seçilerek ve uygun akışkanlaştırıcı katkı kullanımıyla, matristeki tane sıkışma oranı arttırılabilir. Daha sıkı yapılı bir iskelet elde edilerek, hava boşluğu miktarı azaltılabilir. Böylece daha geçirimsiz bir kompozit üretilerek, betonun dayanıklılık özellikleri de geliştirilebilir. Diğer taraftan, tane boyutunun küçülmesi, mikro betonun bünyesine betona kıyasla çok daha yüksek oranda lifi, homojen olarak dağılacak şekilde kabul etmesine olanak sağlamaktadır. İri agrega içeren tasarımlarda böyle bir ihtimal söz konusu değildir. Böylece lifli mikro beton tasarımı, tokluk özelliği gelişmiş bir kompozit üretimine olanak sağlamaktadır.

Victor Li öncülüğünde “*mühendislik özellikleri geliştirilmiş çimento bazlı kompozitler - Engineered Cementitious Composites (ECC)*” olarak adlandırılan lifli mikro beton tasarımları pek çok yapısal uygulama alanı bulmuştur (Kanda ve Li, 2006). Bu örnekler, eğilmeye çalışan kirişlerde yüksek tokluk sağlama ve sehim yapabilme kapasitesini arttırma (Şekil 2.3), çekmeye çalışan yapı elemanlarında çoklu çatlak oluşturarak çekme birim deformasyon kapasitesini arttırma (Şekil 2.4) ve betonarme çerçevelerde düğüm noktası plastik mafsallı oluşumunu engelleme (Şekil 2.5) olarak sıralanabilir. Şekil 2.3’de gözle görülür derecede sehim yapmış bir eğilme elemanı çift noktalı eğilme yüklemesi etkisindedir. Bu derece esnek olması, lifli kompozitin çoklu çatlak oluşturma potansiyelinden kaynaklanmaktadır. Doğrudan çekme etkisi altında da benzer bir davranış söz konusudur. Matris ve lif özellikleri uygun şekilde seçilmiş lifli mikro betonlar çekme etkisi altında da çoklu çatlak davranışı göstermektedir. Çatlak genişliği fazla değişmeden çatlak sayısı artmakta ve bu sırada çekme yükünde düşme olmamaktadır.

Şekil 2.4a’da Polivinil alkol (PVA) ve yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) lifli kompozitlerin çekme gerilmesi altındaki uzama performansları lifsiz ve çelik lifli

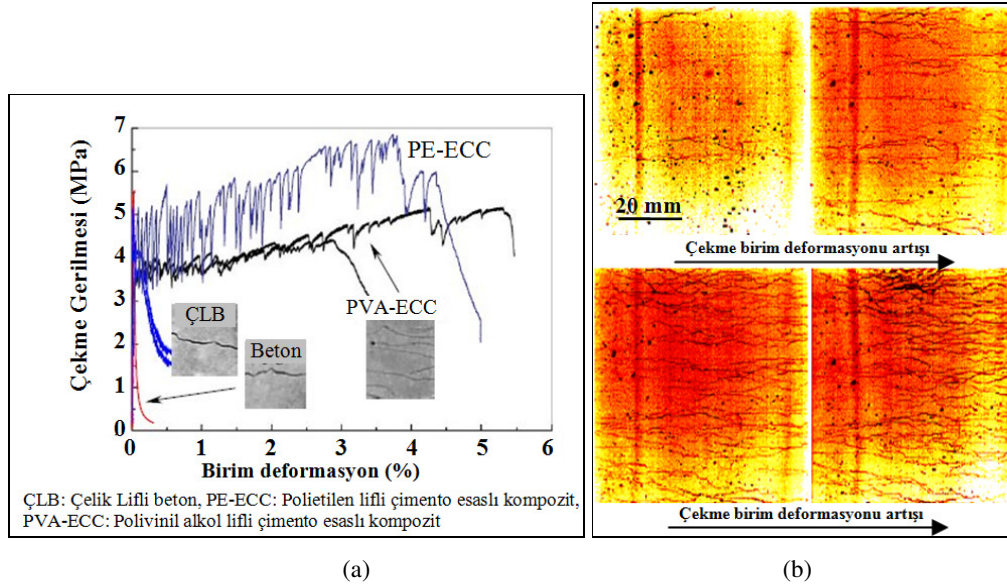
kompozitlerle karşılaştırılmaktadır (Li, 2003b). YYPE lifli kompozitlerde gözlenen çoklu çatlak davranışının çekme birim deformasyonu artışı ile fotoğraflandığı Şekil 2.4b’de çekme gerilmesine dik yönde açılan çatlakların genişliği değişmeden, sayıca artışı açıkça gözlenmektedir (Ostergaard ve Olesen, 2006).



Şekil 2.3 Eğilmeye çalışan lifli mikro beton (ECC) kirişlerde sehim yapabilme kapasitesi ve çoklu çatlak davranışı (Shuster, 2005, Li ve Kanda, 1998).

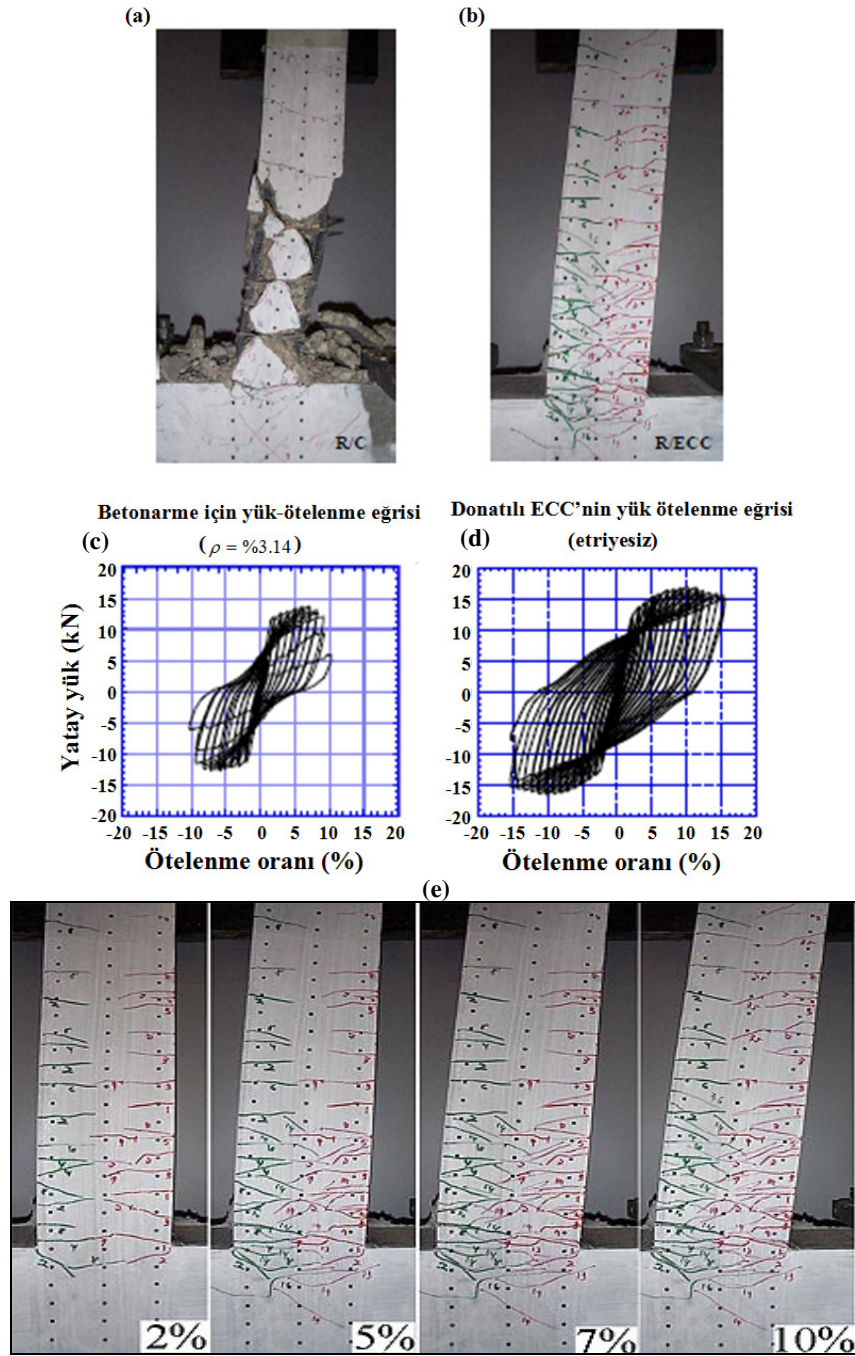
Betonarme yapılarda lifli mikro beton kullanılması halinde, özellikle kolon kiriş bağlantı noktalarında performans farklılıkları rapor edilmiştir. Bu farklılık Şekil 2.5’de verilen deney düzeneği ile ortaya konulmuştur. Geleneksel betonarme sistemde belli bir kiriş deformasyonunda düğüm noktasında plastik mafsallık oluşmakta ve bu bölgedeki beton tabakası tamamen dökülmektedir. Diğer taraftan lifli mikro

beton matrisi kullanımında düğüm noktası bütünlüğünü korumakta, daha yüksek kiriş deformasyonlarında bile (%10 ötelenme) yük taşıma kapasitesini korumaktadır. Şekil 2.5c ve 2.5d’de verilen yük-kiriş deformasyonu histeresiz eğrilerinde de performans farklılığı gözlenebilmektedir.

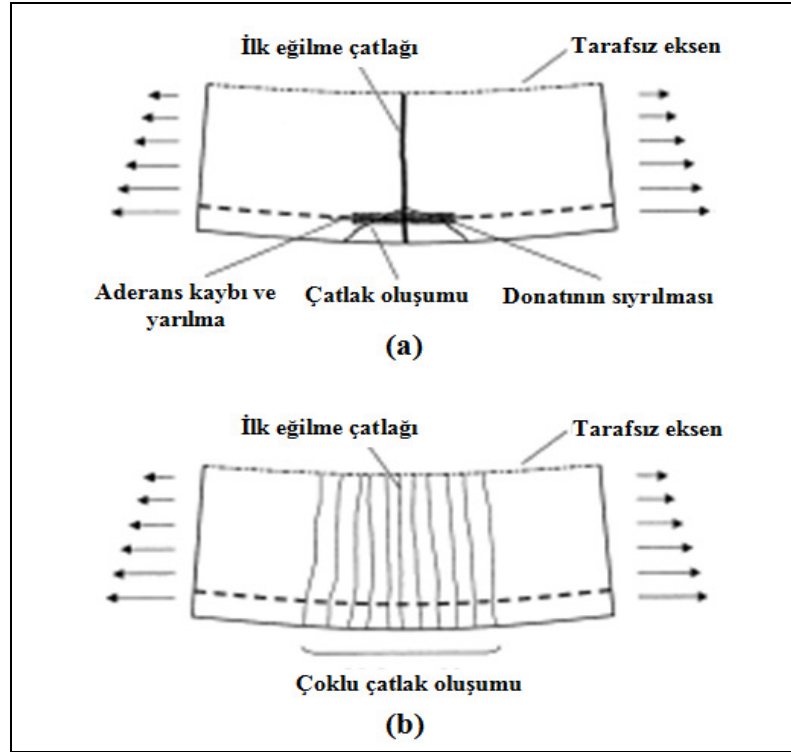


Şekil 2.4 Lifli mikro betonların (ECC) çekmeye çalışan yapı elemanlarında çoklu çatlak oluşturarak çekme birim deformasyon kapasitesini artırması (Li, 2003b, Ostergaard ve Olesen, 2006).

Çatlak genişliğinin kısıtlanması, lifli mikro betonların betonarme sistemle deformasyon uyumluluğu göstermesi ile açıklanabilir. Şekil 2.6’da eğilme etkisindeki betonarme kirişlerin davranışı şematize edilmiştir. Bu kirişlerin matrisleri farklı olup, ilki klasik beton, ikincisi ise lifli mikro betondur. Her iki kirişte de çekme bölgesi donatılandırılmıştır. Matrisin klasik beton olduğu durumda donatı ile matris ara yüzey arasındaki aderansın kaybı ile sıyrılma başlamakta, açıklık ortasındaki çatlak hızla genişlemekte ve donatı matris aderansı da büyük ölçüde ortadan kalkmaktadır. Matris, lifli mikro beton olunca, donatı ile matris ara yüzeyinde oluşan gerilmeleri, lifli matris devreye girerek azaltmakta, donatı beton aderansının kademeli olarak kaybını sağlamaktadır. Böylece aderans kaybının meydana geldiği donatı yüzeyi sınırlı kalmaktadır. Mikro betondan sıyrılan donatı alanı klasik betona kıyasla daha düşük seviyelerde kalmaktadır. Deforme olma kapasitesi daha yüksek olan lifli mikro beton, bu performansı elde edilmesini sağlamaktadır (Fischer ve Li, 2003).



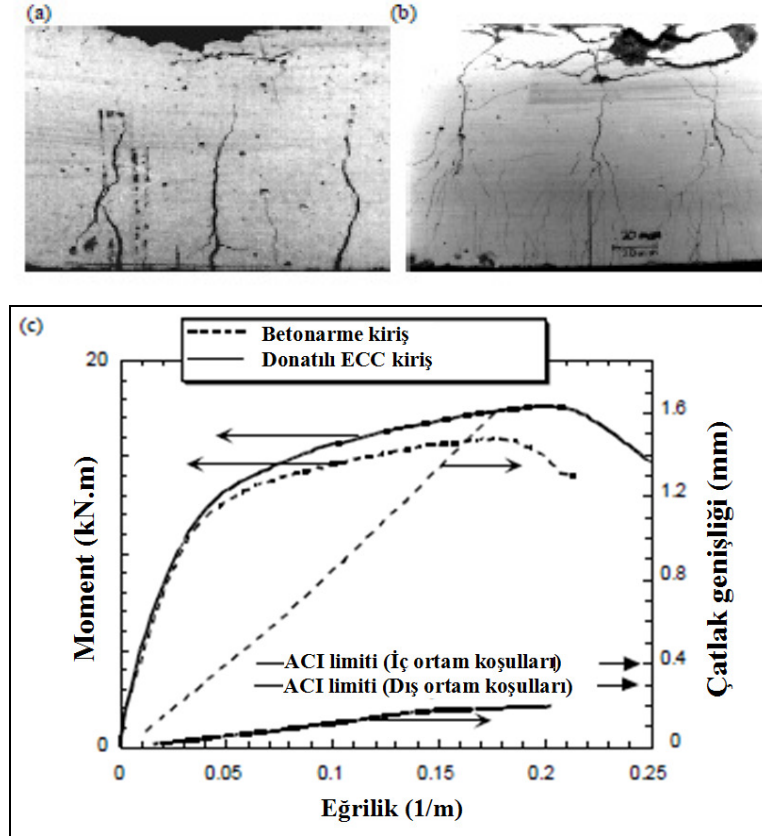
Şekil 2.5 Betonarme çerçevelerde düğüm noktasında plastik mafsall oluşumu: a) Klasik betonarme düğüm noktası, b) Matrisi lifli mikro beton (ECC) olan betonarme düğüm noktası, c) klasik betonarme için yatay yük-ötelenme oranı histeresiz çemberi, d) Matrisi ECC olan betonarme için yatay yük-ötelenme oranı histeresiz çemberi, e) farklı ötelenme seviyelerinde düğüm noktası çevresindeki çatlak gelişimi.



Şekil 2.6 Lifli mikro betonların (ECC) betonarmede yarattığı deformasyon uyumluluğu, a) Klasik betonarme, b) ECC matrisli betonarme (Fischer ve Li, 2003)

2. Lifli mikro betonların tasarımına bağlı olarak bünyelerinde oluşabilecek *çatlak genişliğini sabitleyici, çatlak yayıcı ve azaltıcı* özellikleri bulunmaktadır. Betonarme yapılarda yükleme veya büzülme gibi etkilerle meydana gelebilecek çatlak genişlikleri dayanıklılık açısından önemli olup, standartlarca sınırlandırılmıştır. Örneğin, Amerikan Beton Enstitüsü (ACI-318, 1999) çatlak genişliğini iç ortamlardaki betonarme yapılarda 0,4 mm, dış ortamlardaki yapılarda ise 0,3 mm ile sınırlamıştır. TS 500 (2000) standardında da benzer şekilde iç ortamda ve agresif dış ortamlarda oluşan çatlak genişlikleri, sırasıyla 0,4 mm ve 0,1 mm ile sınırlanmıştır. Lifli mikro betonların çatlak genişliğini azaltmadaki etkinlikleri, Li (2002) tarafından hazırlanan bir deneysel çalışma ile ortaya konulmuştur. Şekil 2.7a ve b'de betonarme kirişlerde çift noktalı yükleme sonrası açıklıkta çatlak dağılımı görülmektedir. Klasik betonarme kirişte çatlaklar belirli bölgede yoğunlaşmış olup, genişlikleri fazla iken, lifli mikro beton matrisli betonarme kirişte çatlaklar yayılma eğilimindedir. Dolayısıyla çatlak genişlikleri de betonarme kirişe kıyasla azalmaktadır.

Şekil 2.7c’de her iki matrisle hazırlanan betonarme kirişlerin moment-eğrilik ilişkileri verilmiştir. Aynı grafikte verilen, paspayı tabakasındaki çatlak genişliği incelendiğinde, lifli mikro betonla hazırlanan örnekte çatlak genişliğinin çok düşük olduğu görülebilir (Li, 2002).



Şekil 2.7 Eğilme etkisindeki betonarme kirişlerde lifli mikro betonun (ECC) performansı, a) Klasik betonarme, b) ECC matrisli betonarme, c) Kirişlerin moment eğrilik ilişkileri ve çatlak genişlikleri (Li, 2002).

Lifli mikro betonların çatlak yayma etkisi, tamir amaçlı kullanımlarını da gündeme getirmektedir. Örneğin, Alkali Silika Reaksiyonu (ASR) hasarı görmüş bir istinat duvarında bu tür bir uygulama gerçekleştirilmiştir. 1970’li yıllarda Japonya’nın Gifu kentinde yapılan 18 m genişliğinde, 5 m yüksekliğindeki bir istinat duvarında, 24 yıllık servis ömründen sonra ASR nedeniyle ciddi çatlak hasarları oluşmuştur. 1994 yılında epoksi reçinesi enjeksiyonu ile çatlaklar tamir edilmiş, ancak bu tamirat da 2003 yılında yeni çatlakların oluşmasına engel olamamıştır. Duvar da 1,5-2 cm genişliğinde çatlaklar mevcuttur (Şekil 2.8a). Bu duvara 2003

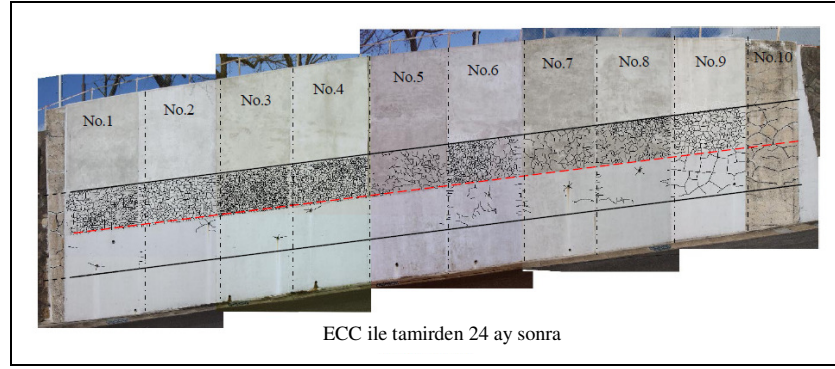
yılında karşılaştırma amacıyla, farklı tamir malzemeleri uygulanmıştır. Dokuz parçaya bölünen duvara iki farklı donatı (tel kafes, genleşen metal) kullanılarak ve donatısız olarak üç tip tamir harcı (iki lifli mikro beton ve bir tamir harcı) püskürtülerek uygulanmıştır. Harç kalınlıkları 5-7 cm olup, akrilik bazlı yüzey koruyucuların da etkisini incelemek amacıyla; her düşey bantın alt tabakaları bu koruyucularla kaplanmıştır (Şekil 2.8b). Lifli mikro betonlarda ilk 7 ay gözle görülür çatlak yok iken, 10. ve 24. aylarda çatlak genişlikleri 0,05 mm ve 0,12 mm olarak ölçülmüştür. Çatlakların çok dar olması nedeniyle kirlenen yüzeyde görülmeleri bile güçleşmiştir. Şekil 2.8b’de çatlaklar özellikle görülmeleri için fotoğraflar üzerinde işaretlenmiştir. Diğer yandan tamir harcı ile yapılan onarımda çatlaklar bir ay içinde gözle görülür hale gelmiş, 10 ve 24. aylarda ortalama genişlikleri sırasıyla 0,2 ve 0,3 mm’ye ulaşmıştır (Rokugo, Kunieda ve Miyazato, 2006). Bu çatlaklar da fotoğraflar üzerinde işaretlenmiştir ancak boyutları gözle görülecek büyüklüktedir. Bu örnek, lifli mikro beton ile yapılan onarımın durabilite açısından avantajını göstermektedir.

Lifli mikro betonların kullanıldığı tamir uygulamalarından biri de, Japonya’daki Mitaka barajında ve Shiga ana kanaletinde yapılmıştır (Şekil 2.9). Barajın mansap kısmındaki mevcut beton yüzeyi hasar gördüğü için 500 m²’lik bölge temizlenip, eski beton yüzeye lifli mikro beton 30 mm kalınlığında püskürtülmüştür (Şekil 2.9a). Kanalet onarımında ise lifli mikro beton, su jeti ile temizlenen eski yüzeye 6-10 mm kalınlığında mala ile uygulanmıştır (Şekil 2.9b). (Rokugo ve diğer., 2006, Kunieda ve Rokugo, 2006)

3. Lifli mikro betonlar yapısal güçlendirme uygulamalarında da kullanım alanı bulabilmektedir. Mikro betonlardan plaka formundaki kompozitler üretilmektedir. Bu ince plakaların, eğilme etkisindeki elemanların tabanına yapıştırılması veya farklı yöntemlerle ankrajı durumunda, mevcut eğilme-sehim performansının sağladığı tokluktan çok daha yüksek tokluğa ulaşmak mümkün olmaktadır. Şekil 2.10’da bu amaçla hazırlanmış bir kompozitin performansı, çekme bölgesinde plakanın olmadığı durumla karşılaştırmalı olarak görülmektedir (Ogawa, Hitomi ve Hoshiro, 2005).

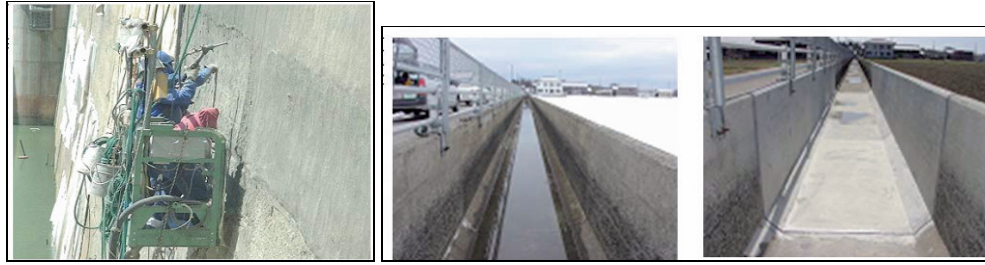


(a)



(b)

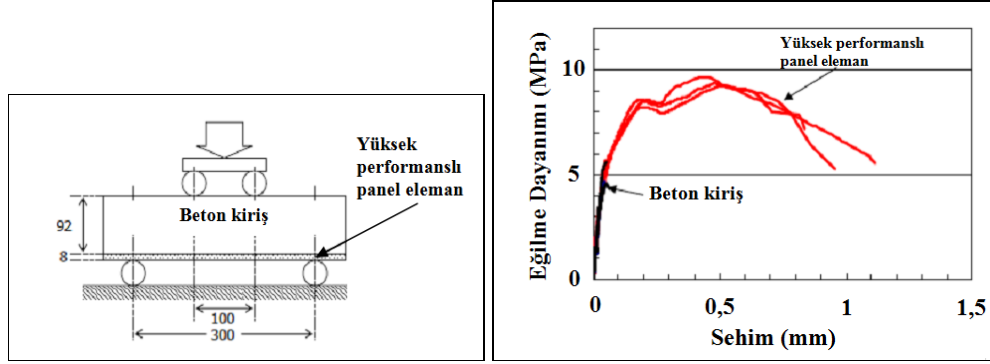
Şekil 2.8 ASR hasarı görmüş 30 yıllık bir istinat duvarında yapılan lifli mikro beton (ECC) ile tamiri (Rokugo ve diğer., 2006).



(a)

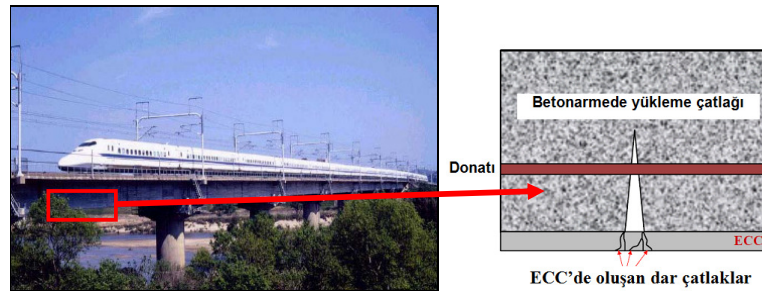
(b)

Şekil 2.9 Japonya'da lifli mikro betonların (ECC) kullanıldığı tamir uygulamaları, a) Baraj betonu onarımı, b) Kanalet onarımı (Kunieda ve Rokugo, 2006)



Şekil 2.10 Eğilme etkisindeki yalın betonun ve çekme bölgesine plaka formunda lifli mikro beton (ECC) yerleştirilmiş kompozitin yük-sehim grafikleri (Ogawa ve diğer., 2005).

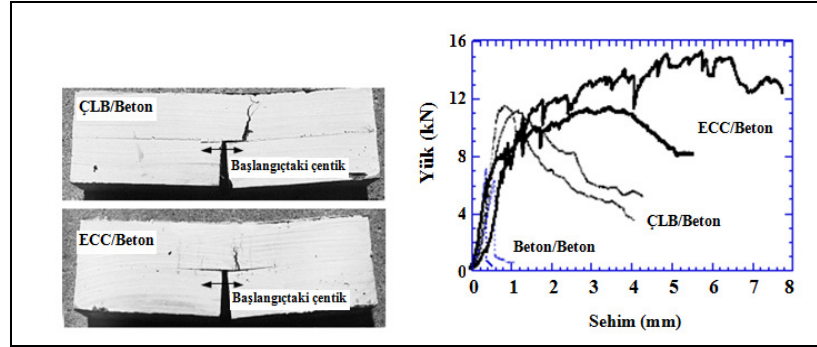
Bir önceki paragrafta incelenen güçlendirme yöntemi yapısal performans artışının yanısıra dayanıklılık açısından da avantaj sağlayabilir. Özellikle viyadüklerde kullanılan geniş açıklıklı ön gerilmeli kirişlerde, çeşitli nedenlerden dolayı meydana gelen sehim kiriş açıklığında çatlamaya yol açabilir (Şekil 2.11). Bu tür bir çatlak, aynı zamanda paspayının ortadan kalkmasına yol açtığı için korozyon riskini gündeme getirecektir. Sözü edilen kirişlerin tabanlarına lifli mikro beton yapıştırılması halinde plakanın çatlak yayıcı etkisi hem betonarmedeki çatlakların genişlemesini önleyecek hem de nemin bünyeye girişini engelleyecektir (Inaguma, Seki, Suda ve Rokugo, 2005).



Şekil 2.11 Köprü kirişi açıklıklarında lifli mikro beton (ECC) plakalarla yapılan güçlendirme (Inaguma ve diğer., 2005).

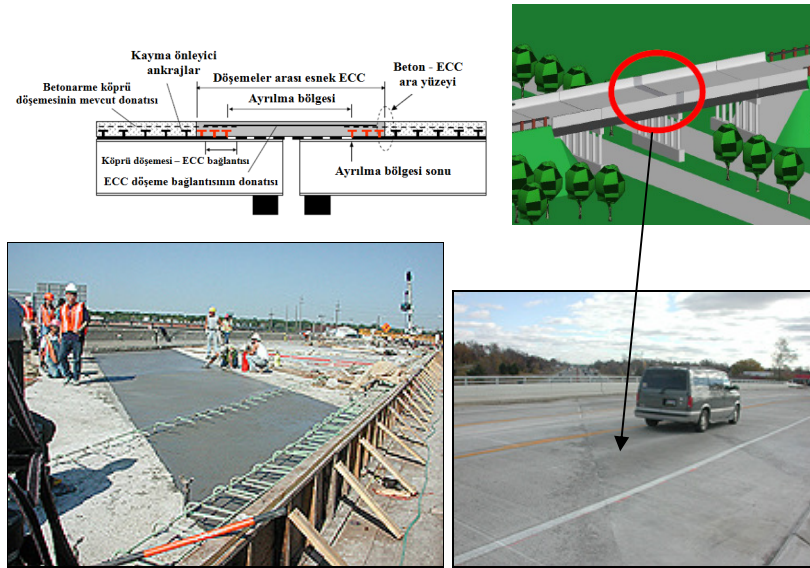
4. Viyadük ve köprü kirişlerinin arasındaki bağlantı noktalarında, diğer bir deyişle, mesnetlerdeki derz bölgesinde kirişlerin birbiri ile bağlantısının olmadığı hareketli bir bölge bulunmaktadır. Bu bölge üzerine bir tabaka uygulanması halinde kompozit Şekil 2.12'deki gibi modellenebilir. Tam olarak gerçeğe uymasa da,

kirişlerin birbirinden uzaklaşma hareketi eğilme yükü uygulaması ile benzetilmeye çalışılmıştır. Tabakanın yalın beton, çelik lifli beton veya lifli mikro beton olması halinde, kompozitten elde edilen yük-sehim grafikleri, lifli mikro betonların performansını açıkça göstermektedir. Çelik lifli beton (ÇLB) tabakasında tek bir çatlak genişlerken, lifli mikro betonda çok sayıda çatlak oluştuğu görülmektedir. Ancak deneyin sonuna doğru tek bir çatlağın genişlediği rapor edilmiştir (Li, 2002).



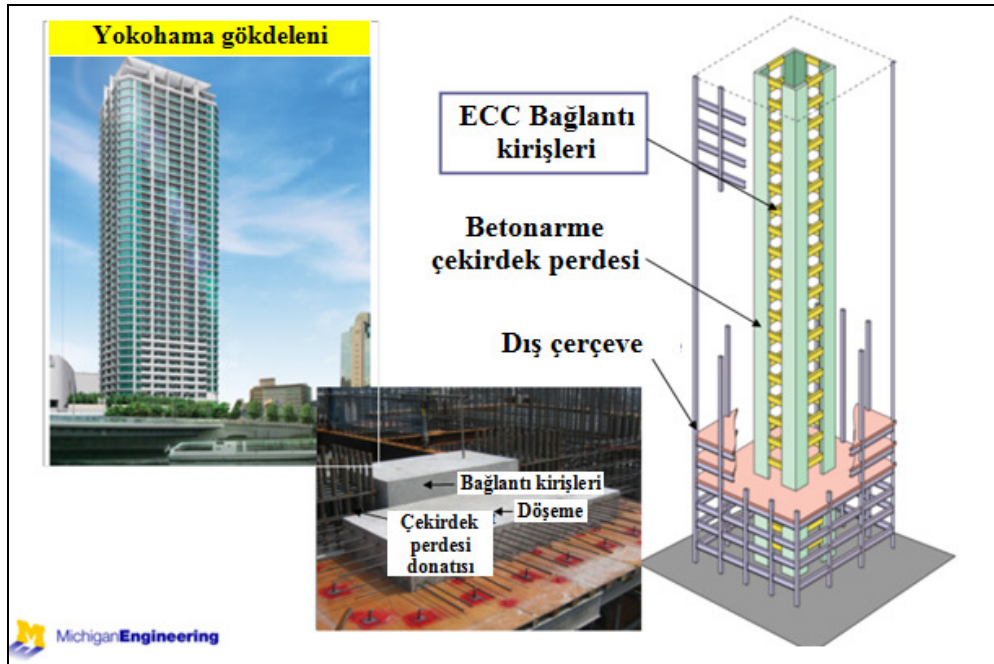
Şekil 2.12 Beton kirişlerin üzerine farklı tabaka uygulamalarının kompozitin eğilme performansına etkisi (Li, 2002).

Viyadük ve köprülerin mesnetlerindeki derz bölgelerinde lifli mikro beton uygulaması Amerika'nın Michigan Eyaletinde 2005 yılında gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.13) (Li ve Lepech, 2006).



Şekil 2.13 Amerika'nın Michigan Eyaletinde 2005 yılında gerçekleştirilen lifli mikro beton (ECC) uygulaması (Li ve Lepech, 2006)

5. Yapısal tasarım açısından, MB'nin yeterli tokluk ve dayanıma sahip olması halinde, tasarlanan kesitlerin küçülmesi ve yapıda hacim kazanılması sağlanabilir. Aynı zamanda dinamik etkiler altındaki yapı elemanlarının tasarımında, lifli mikro betonların enerji yutma kapasiteleri ve deformasyon yapabilme özellikleri avantaj sağlayabilmektedir. Özellikle Japonya'da yüksek yapıların tasarımında, dinamik etkilerin ya da çekme etkisinin önem kazandığı yapı elemanlarında lifli mikro betonlar da kullanılmıştır (Kunieda ve Rokugo, 2006). Örneğin, 2007 yılında tamamlanan 41 katlı Yokohama Gökdeleni'nde, çekirdek perdelerini birbirine bağlayan betonarme kirişler lifli mikro beton matrisi kullanılarak üretilmiştir (Şekil 2.14).



Şekil 2.14 Yokohama gökdeleninde çekirdek perdelerini birbirine bağlayan betonarme kirişlerde lifli mikro beton (ECC) kullanımı (Kunieda ve Rokugo, 2006).

Diğer bir örnek de Tokyo'nun merkezinde bulunan 27 katlı Glorio Roppongi Gökdeleni'dir (tamamlanma yılı 2005). Bu yapıda çekirdek perdelerinin arasındaki sönümleyici (damper) elemanlar ($2 \times 27 = 54$ adet) lifli mikro beton olup, vibrasyon sönümleyici özelliği, kesme etkisinde yüksek deformasyon kapasitesi ve enerji yutma yeteneği nedeniyle tercih edilmiştir (Şekil 2.15). Piyasadaki diğer

sönümleyicilere kıyasla daha ekonomik olmasının yanı sıra depremden sonra onarım maliyetinin de düşük olacağı öngörülmüştür (Kunieda ve Rokugo, 2006, Rokugo ve diğer., 2006).



Şekil 2.15 Glorio Roppongi gökdeleninde kullanılan lifli mikro beton sönümleyiciler (Kunieda ve Rokugo, 2006).

6. Lifli mikro beton plakalar aynı zamanda prefabrik kirişlerin mesnetlere oturtulmasında kullanılan elastomer mesnet yastıklarına alternatif olabilir (Barboza, El Debs ve Soares, 2002). Şekil 2.16'da bu amaçla hazırlanan prototip mesnet yastıkları görülmektedir. Lifli mikro betonların basınç gerilmesi altında da deformasyon yetenekleri dikkate alınarak geliştirilen bu prototipler gelecekte pahalı elastomer mesnetlerin yerini alabilir.

7. Zımbalama, kesme ve parçalanma etkilerine karşı dirençli yapı elemanlarının üretiminde lifli mikro betonlardan yararlanılabilir (Li ve Kanda, 1998). Liflerin matrisi bir arada tutucu etkisi nedeniyle mikro betonla üretilen plaka elemanlar, zımbalama etkisine karşı lifsiz betondan daha dirençlidir (Şekil 2.17).

8. Lifli mikro beton plakalar, esneklikleri ve çatlak açılmasına karşı dirençleri nedeniyle pek çok çimento bazlı çatı kaplama malzemesine alternatif olabilirler.

Kırılgan olmamaları nedeniyle bu malzemelere çivi bile çakılabilmektedir (Şekil 2.18) (Ogawa ve diğer., 2005).



Şekil 2.16 Elastomer mesnet yastıklarına alternatif olabilecek lifli mikro beton mesnet yastıkları (Barboza ve diğer., 2002).



Şekil 2.17 Lifsiz döşemde ve PVA lifli mikro beton (ECC) döşemde zımbalama etkisi sonrası yüzey görünümü (Li ve Kanda, 1998).



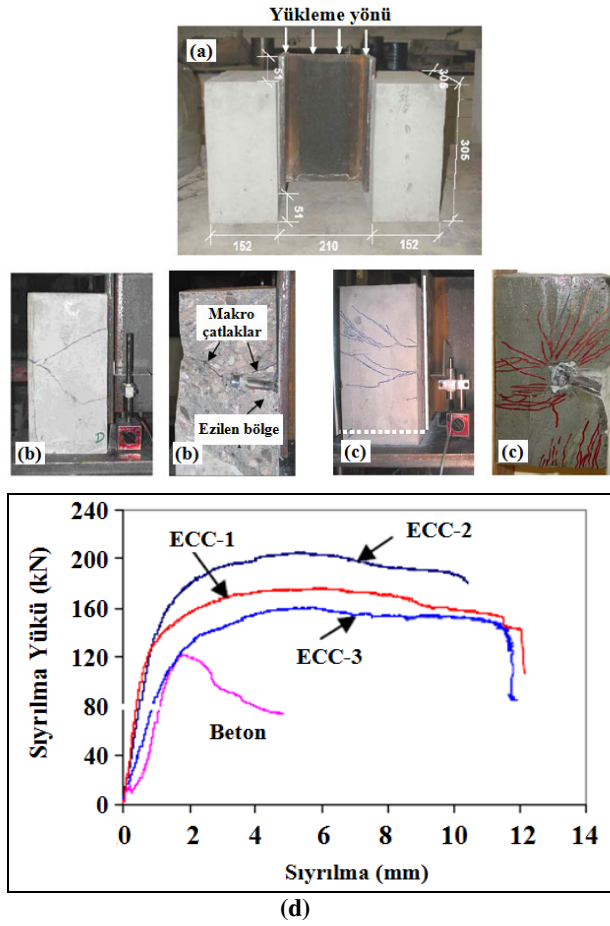
Şekil 2.18 Lifli mikro beton plakalara çivi çakılabilir (Ogawa ve diğer., 2005).

9. Geleneksel betona çelik bulonlar gömülerek yapılan bağlantılar genellikle kolayca açılmakta, beton örtü tabakası kısa sürede çatlayarak çelik bulonların açığa çıkmasına neden olmaktadır (Şekil 2.19). Lifli mikro beton kullanılarak yapılan bir bağlantı ise yalın betona kıyasla çok daha uzun ömürlü olacaktır. Bu konuda yapılan deneysel bir çalışmada kullanılan deney düzeneği Şekil 2.20a’da verilmiştir. Çelik bir I profile kaynaklanmış bulon cıvatası ile birlikte betona gömülmüştür. Çelik I profilin tabandan yüksekliği 51 mm’dir. Profile uygulanan yükleme ile betona gömülü bulonlara kayma gerilmesi etkimektedir. Deney sonucunda klasik beton ile hazırlanan örnekte iri çatlaklar ve betondan sıyrılan cıvata gözlenirken, lifli mikro beton ile hazırlanan örneklerde en fazla 40 mikron genişliğinde kılcal çatlaklar oluşmuştur. Bu çatlaklar gözle görülemediği için kalemle işaretlenmiştir (Şekil 2.20b). Aynı zamanda çok daha yüksek yük seviyelerinde bulonlar mikro betondan ayrılmamışlardır. Üstelik bu yük seviyeleri sıyrılmanın 12 mm’ye ulaşmasına kadar korunmuştur (Qian ve Li, 2005).

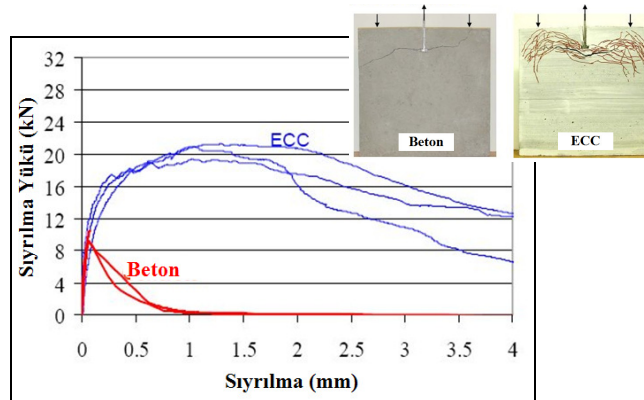


Şekil 2.19 Betona gömülü çelik bulonun ankrajının zayıflığı nedeniyle bulonun açığa çıkması, (Qian ve Li, 2005).

Qian ve Li (2005), doğrudan çekme etkisindeki ankraj vidasının geleneksel beton ve lifli mikro betondan sıyrılmasını da bir başka çalışmada incelemiştir (Şekil 2.21). Bu deney düzeneğinde de lifli mikro betonun performans üstünlüğü hem grafikten hem de deney örneklerinde oluşan çatlakların sayı ve dağılımından açıkça görülmektedir.

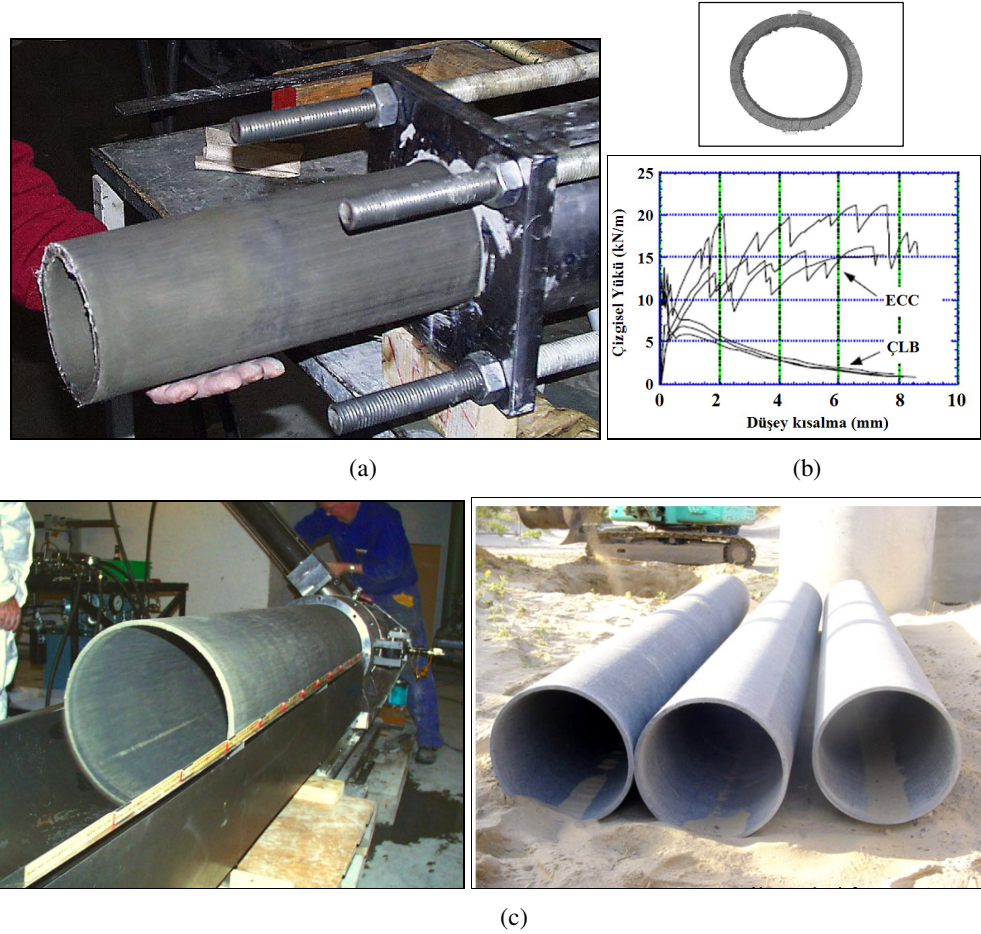


Şekil 2.20 Bulon ankrajının geleneksel beton ve lifli mikro beton içindeki performansının karşılaştırılması için hazırlanan deney düzeneği (a) ve sonuçlar (b-d) (Qian ve Li (2005)).



Şekil 2.21 Doğrudan çekme etkisindeki ankraj vidasının geleneksel beton ve lifli mikro betondan sıyırılması Qian ve Li (2005).

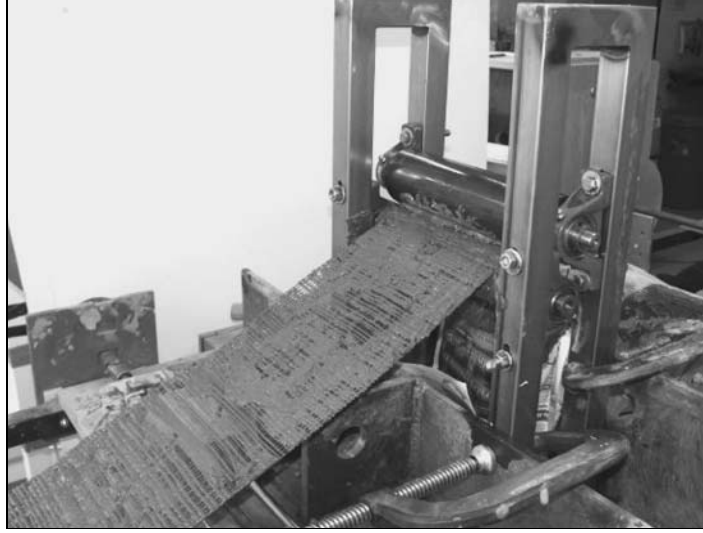
10. Mikro beton; ekstrüzyon veya pultrüzyon gibi özel üretim teknikleri yardımıyla, kısa kesilmiş lifli ya da sürekli formda örgü lifli kompozitlerin üretiminde kullanılabilir. Stang ve Li (1999) donatısız ve ince cidarlı su borusu prototipini ekstrüzyon yöntemi ile %7 polipropilen veya polietilen lif içeren mikro beton kullanarak hazırlamıştır (Şekil 2.22a). Bu boruların tepe basıncı - düşey deformasyon grafikleri klasik lifli harca göre önemli farklılıklar göstermektedir (Şekil 2.22b). Bu nedenle daha sonra donatısız ve ince cidarlı su borusu, ekstrüzyon yöntemi ile fabrika ortamında üretilmeye başlanmıştır (Şekil 2.22c).



Şekil 2.22 Ekstrüzyon yöntemi ile donatısız ve ince cidarlı su borusu üretimi (Stang ve Li, 1999, Li, 2002).

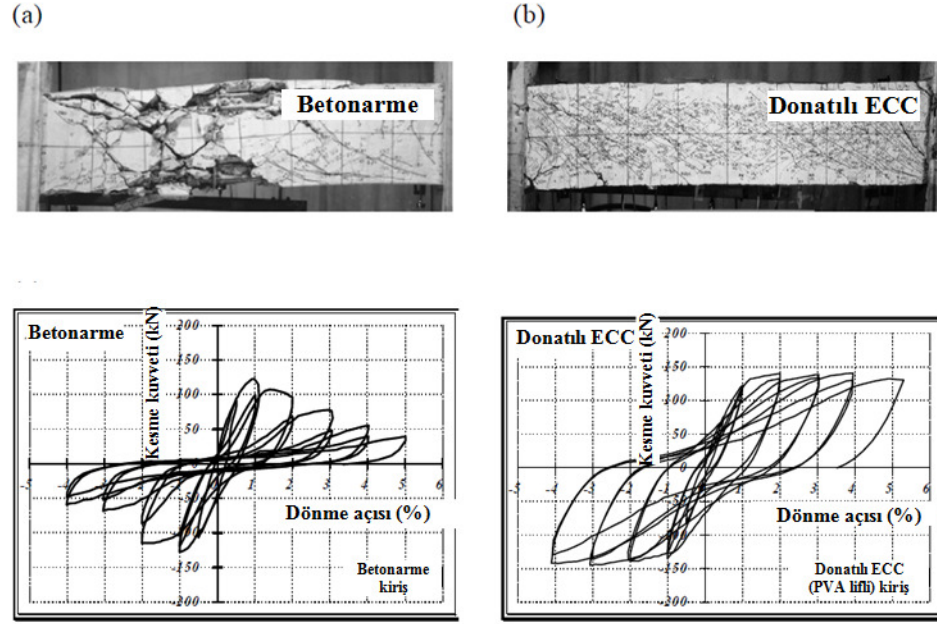
Mikro beton matrisi ve tekstil örgüleri kullanılarak, pultrüzyon yöntemi yardımıyla yüksek çekme dayanımına sahip çimento bazlı kompozitler üretilebilir (Mobasher, Peled ve Pahlajani, 2006, Keoleian, Kendall, Lepech ve Li, 2006).

Mobasher ve diğ. (2006), iki yönlü polimer ve cam lifi tekstil örgüleri kullanarak Şekil 2.23'deki sistem yardımıyla kompozitleri üretmiştir. Bu kompozitlerden, çekme dayanımları 20MPa'ın üzerine ve tokluk değeri de 10000 N.mm'nin üzerine çıkanlar bulunmaktadır.



Şekil 2.23 Pultrüzyon yöntemi ile tekstil örgülü kompozit üretimi (Mobasher ve diğ., 2006).

11. Tekrarlı kayma gerilmesi oluşturan yükler altında, lifli mikro beton ile hazırlanan betonarme kompozitlerin daha iyi performans sağladıkları belirlenmiştir. Kayma gerilmesi oluşturan tekrarlı yükler altındaki betonarme kirişlerin davranışının incelendiği bir deneysel çalışmada, klasik beton ve lifli mikro beton matrisler için kayma kuvveti-dönme açısı grafikleri Şekil 2.24'de görülmektedir (Li, 2002). Bu grafikler ve örneklerin deney sonrasındaki görünüşleri lifli mikro beton matrislerin performansını göstermektedir. Lifli mikro beton kompozitte çatlaklar 45 derece eğimli ve mikro boyutta iken, diğer kompozitte parça dökülmesi ve çok yüksek dönme açılarında çok düşük kayma yükleri görülmüştür. Lifli mikro beton, kayma gerilmesini karşılamak için kullanılan etriyelerin yük taşıma kapasitesini arttırmaktadır.



Şekil 2.24 Kayma gerilmesi oluşturan tekrarlı yükler altındaki betonsarme kirişlerin davranışı; a) klasik beton matris, b) lifli mikro beton matris (Li, 2002).

12. Lifli mikro betonların bünyesinde iri agrega olmadığı için kıvam özellikleri uygunsa (kendiliğinden yerleşen), geometrik formu ilginç, ince cidarlı heykel tasarımı kullanılabilir (Oros, 2008).

Yukarıda sıralanan avantajlarının yanında mikro betonların çeşitli dezavantajları da dikkate alınmalıdır:

1. Lifsiz mikro beton oldukça gevrek olduğundan ani yükleme ve darbe etkilerine karşı oldukça dayanıksızdır.

2. Mikro beton iri agrega veya ince agrega içermediği için, reolojik davranışı geleneksel betona, kıyasla farklıdır. Tiksotropik özellik göstermesi nedeniyle uygulamada kesikli üretim yapılması, mikro betonu yerleştirme sorunlarına yol açabilir. Bilinçli uygulama yapılmaması halinde soğuk derz problemi yaratabilir.

3. Mikro betonun fiziksel özellikleri (elastisite modülü, termal genleşme katsayısı) klasik betondan farklı olduğundan derzlerde uyum sorunları gözlenebilir.

4. Sünme davranışı belirsiz olup, farklı yük seviyelerinde polimer liflerin sünme riski dikkate alınmalıdır.

5. Polimer lifler yüksek sıcaklığa karşı dayanıksız olduğu için yangın etkisine hassastır.

6. Mikro betonda iri agrega olmaması nedeniyle mikro betonun aşınma hassasiyeti olabilir. Sürtünme etkisi altındaki yapı elemanlarında performansı araştırılmalıdır.

7. Durabilite açısından çatlak genişliğini kısıtlaması önemli bir avantajdır. Ancak ekstrem koşullarda çok uzun süreli performansının incelendiği örnek yapılar henüz yoktur.

2.2 Mikro Beton Tasarımında Matris Bileşenlerinin Genel Performansa Etkisi

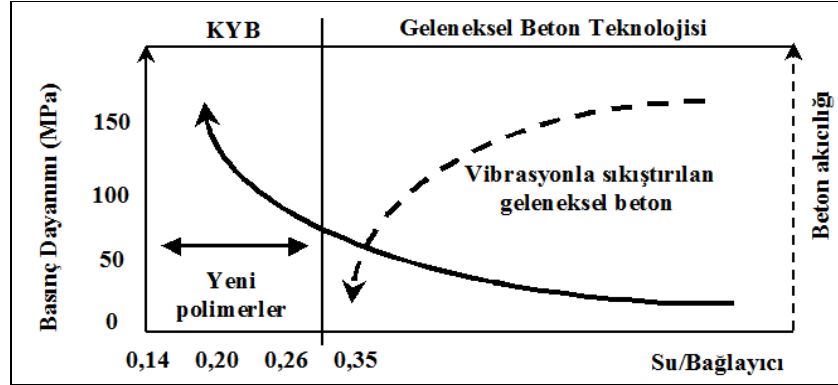
Mikro beton tasarımının ilk aşamasında malzemelerle ilgili tasarım parametrelerinin taze mikro beton reolojisine etkileri araştırılmıştır. Bu parametreler üç grupta toplanabilir (Saak, 2000):

1. Su/bağlayıcı oranı ve akışkanlaştırıcı katkı dengesi,
2. Mikro agrega ve bağlayıcıların türü ile karışımındaki oranları,
3. Mikro agrega ve bağlayıcıların fiziksel özellikleri.

2.2.1 Su/bağlayıcı Oranı - Akışkanlaştırıcı Katkı Dengesi

Mikro betonların su/bağlayıcı oranı (S/B) – katkı miktarı arasında ayarlama yapılarak reolojik özellikleri değiştirilebilir. Son yıllarda beton teknolojisinde kullanılan etkili akışkanlaştırıcıların geliştirilmesi ile kendiliğinden yerleşebilirlik özelliğini düşük su/bağlayıcı oranlarında sağlamak mümkün olmuştur (Şekil 2.25). Özellikle polikarboksilat kökenli katkıların sağladığı, fiziksel itki mekanizması düşük S/B oranlarında akıcı kıvamda matrislerin oluşturulmasına olanak sağlamaktadır (Hanehara ve Yamada, 2008). Benzer şekilde, kendiliğinden yerleşen mikro beton tasarımında da katkı dozajı – S/Ç oranı dengesi sağlanarak eşik kayma

gerilmesi azaltılıp, viskozite istenilen seviyeye getirilebilir. Böylece hem kolay yerleşebilen hem de yerleştiği kalıpta az miktarda sıkışık hava boşluğu bırakan ve stabilitesini koruyan karışımların hazırlanması mümkün olmaktadır.



Şekil 2.25 Akışkanlaştırıcı katkıların etkinliği ve su/bağlayıcı – katkı dengesi.

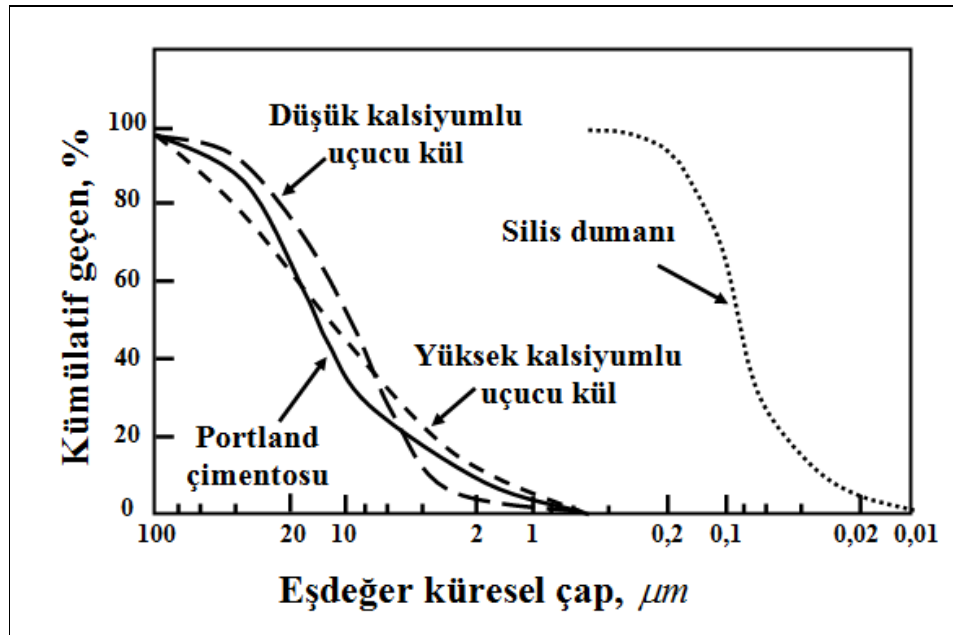
2.2.2 Mikro Agregaların, Bağlayıcıların Türü ve Karışımındaki Oranları

Yüksek performanslı çimento bazlı kompozitlerin kullanımının yaygınlaşması, mikro agrega malzemelere olan ilgiyi arttırmaktadır. En büyük parçacık boyutu 1 mm'nin altında her türlü inorganik madde, mikro beton üretiminde "mikro agrega" amacıyla potansiyel olarak kullanılabilir. Ancak söz konusu maddelerin çimento ile reaksiyona girerek boyutsal stabiliteyi ve mekanik özellikleri olumsuz etkilememesine dikkat edilmelidir. Parçacık boyutunun küçülmesi parçacıklar arası etkileşimin de artmasına neden olur. Bu etkileşim, su veya akışkanlaştırıcı katkı ilavesi yapılmadığı durumda viskoziteyi artırır, toz maddeler bir bakıma viskozite arttırıcı olarak da isimlendirilebilir. Pratikte kullanılabilirliği olan toz malzemeler için gerek mineralojik ve kimyasal köken, gerekse reaktivlik açısından bir sınıflandırma EFNARC Komitesi (2002) tarafından yapılmıştır. Bu sınıflandırmaya göre; inert, yarı inert, puzolanik veya gecikmeli hidrolik bağlayıcılık özelliklerine sahip olan malzemeler şu şekilde sıralanmıştır:

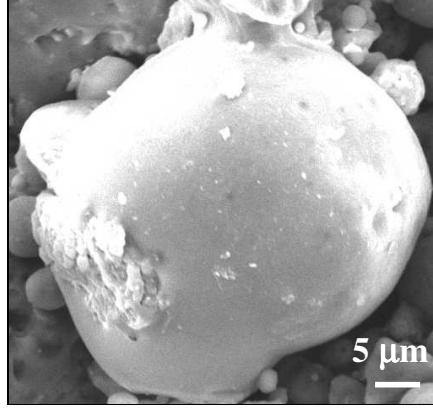
- kireçtaşı, granit, kuvars kumu tozları,
- doğal cüruf ve traslar, yapay cüruflar,
- uçucu kül, silis dumanı, metakaolin.

Mikro agreganın bağlayıcı madde miktarına oranı reolojik davranışı etkilediği gibi, karışımın boyutsal stabilitesini ve mekanik özelliklerini de değiştirmektedir. Hedeflenen dayanım sınıfına göre en uygun oranın tespiti, deneysel olarak yapılmalıdır.

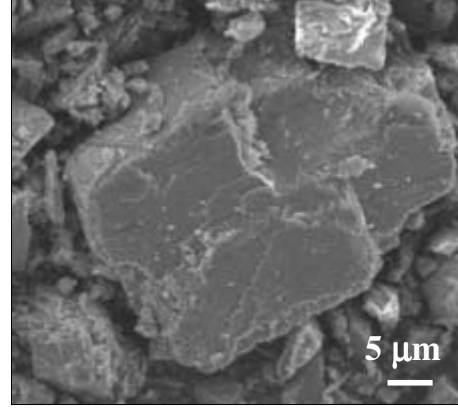
Bağlayıcı maddelerin de kendi içindeki oransal değişimleri tasarımda önemli bir değişkendir. Çimento yanında *uçucu kül*, *yüksek fırın cürufu*, *silis dumanı* vb. puzolanik malzemeler kullanılması halinde, dayanım gelişiminin değişebileceğine dikkat edilmelidir. Sözü edilen maddelerin tane boyut dağılımları, morfolojik özellikleri ve tane şekilleri birbirinden oldukça farklıdır (Şekil 2.26, 2.27). Bu şekillerde verilen örnekler temsili olup, aynı türden çok farklı özellikte olan malzemelere de rastlanabilir. Örneğin, aynı grupta olan uçucu kül bile temin edildiği termik santralde kullanılan kömüre bağlı olarak çok farklı karakterde olabilir (Türker, Erdoğan, Katnaş ve Yeğinobalı, 2004). Bu tür malzemeler karışımda kullanılmadan önce mutlaka bir incelemeden geçirilmelidir.



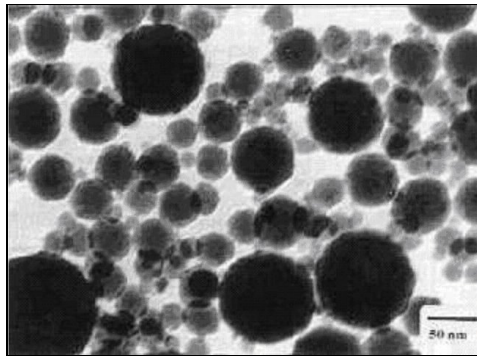
Şekil 2.26 Bağlayıcı ve puzolanik maddelerin tane boyut dağılımları.



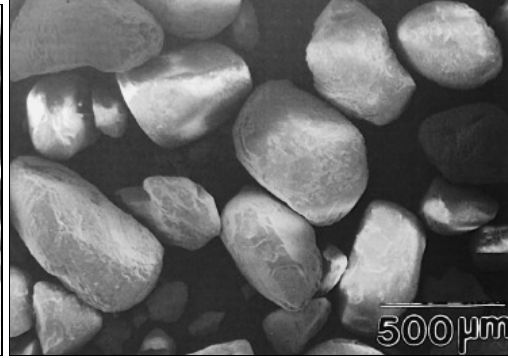
C sınıfı uçucu kül



Kireçtaşı tozu



Silis dumanı



Kuars tozu

Şekil 2.27 Kireçtaşı tozu, kuvars tozu, uçucu kül ve silis dumanının tane şekilleri ve yüzey özellikleri (Felekoglu, Türkel ve Kalyoncu, 2009, Felekoglu 2007, Collepari, Olagot, Skarp ve Troli, 2002, Ferraris, Hackley ve Aviles, 2004).

2.2.3 Mikro Agregalar ve Bağlayıcıların Fiziksel Özellikleri

Mikro agregaların ve bağlayıcıların fiziksel özellikleri mikro betonun matris performansını doğrudan etkilemektedir. Her fiziksel özelliğin mikro betonun matris performansına etkisi ayrı ayrı incelendiğinde teorik olarak bir sonuca ulaşmak mümkündür. Bu bölümde, mikro agregaların tane boyutu, tane şekli ve yüzey morfolojisi karakterizasyon yöntemleri kısaca özetlenecektir. Ancak söz konusu fiziksel özellikler (yoğunluk, su emme, tane boyut dağılımı, tane şekli ve yüzey morfolojisi), mikro agregadan mikro agregaya farklı oranlarda değiştiği için, tekil inceleme sonuçları ile matris performansının ne yönde değiştireceğini kestirmek her zaman mümkün olmayabilir. Bu nedenle genelleme yapmak her zaman mümkün değildir.

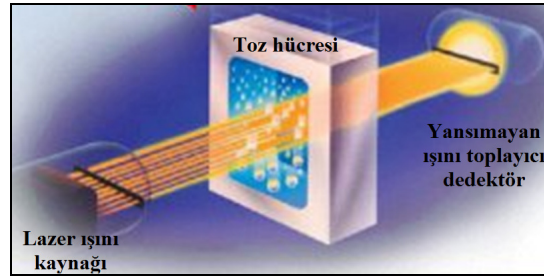
2.2.3.1 Mikro Agregaların Tane Boyutu Karakterizasyonu

İnce öğütülmüş mikro agregaların tane boyut dağılımının tespiti, oldukça zor bir konudur. Klasik Blaine deneyi, toz malzemelerin inceliğini ve boyut dağılımını belirlemede yetersiz kalmaktadır (Nischer, 1999). Çok ince malzemelerin yüzey alanlarını ölçmede kullanılan BET (*Brunauer, Emmett, and Teller*) yüzey alanı yöntemi de her zaman tanelerin inceliği hakkında sağlıklı sonuç vermeyebilmektedir (Esping, 2008, Yükselen ve Kaya, 2006). Çünkü bu yöntemlerde havanın veya nitrojen gazının taneler arasından geçiş hızı ölçülmektedir. Tanelerin pürüzlü ve şekilsiz olması halinde, aralarındaki temas mesafesi değişeceğinden ölçülecek incelik değeri de değişecektir. Tane boyutunda 1000 μm 'den 0,1 μm 'ye kadar çok geniş bir dağılım söz konusu olduğundan kullanılacak tekniğin seçiminde belirli sınır değerlerin öngörülmesi gerekir. Bu sınır değerlere, hedeflenen ölçüm hassasiyetine, kullanılacak cihazın çalışma prensibine ve özelliklerine göre, her yöntem farklı optimum tane boyutu aralıklarında gerçeğe en yakın sonucu vermektedir. Diğer yandan pek çok mikro agrega kuru halde dahi topaklaşma eğilimindedir. Bu tanelerin birbirinden ayrıştırılması ve dağılımın o halde belirlenmesi de gerçeğe en yakın tane boyut dağılımının belirlenmesinde önemli bir etkidir.

Parçacık tane boyut dağılımının belirlenmesinde kullanılan başlıca yöntemler; Lazer Difraksiyon Dağılımı (LASER Diffraction Scattering-LDS), Yarı Elastik Işın Dağılımı (Quasi-Elastic Light Scattering-QELS), Dar Açılı Nötron Dağılımı (Small Angle Neutron Scattering-SANS), Dar Açılı X-ışını Dağılımı (Small Angle X-Ray Scattering-SAXS), Lazer Dopler Hız Ölçümü (LASER Doppler Velocimetry-LDV), Elektriksel Alan Algılama Yöntemi (Electrical Zone Sensing Method-EZS), Diferansiyel Hareketlilik Analizi (Differential Mobility Analysis-DMA), Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy-SEM), Geçirimli Elektron Mikroskobu (Transmission Electron Spectroscopy-TEM), X-ışını Yerçekimi ile Çökeltme Yöntemi (X-Ray Gravitational Sedimentation Method-XGS), Optik Merkezkaç Çökeltme Yöntemi (Optical Centrifugal Sedimentation Method-OCS), X-ışını Merkezkaç Çökeltme Yöntemi (X-Ray Centrifugal Sedimentation-XCS), Çökeltme Alanı Akış Oranlaması Yöntemi (Sedimentation Field Flow Fractionation-

SdFFF), Gaz Emdirmeli Yüzey Alanı Analizi (Gas Adsorption Surface Area Analysis-BET), Akustik Spektroskopi (Acoustic Attenuation Spectroscopy -AAS), Elektroakustik Spektroskopi (Electroacoustic Spectroscopy-ESA) olarak sıralanabilir (Ferraris, Hackley, Aviles ve Buchanan, 2002a).

Yukarıda sıralanan tüm yöntemler belirli sınırlar arasındaki tane boyut dağılımını tespit etmekte kullanılmaktadır. En sağlıklı sonuçlar, küresele yakın formdaki pürüzsüz taneler için elde edilmektedir. Küresellikten sapmanın ve tane pürüzlülüğünün deney sonuçlarına etkisi deney yöntemine göre değişkenlik göstermektedir. Parçacık tane boyut dağılımını belirlenmesinde en çok kullanılan yöntem Lazer Difraksiyon Dağılımıdır (LASER Diffraction Scattering-LDS). Hacimsel ve mikro formdaki elek analizi gibi düşünülebilir. Çalışma prensibi Şekil 2.28’de özetlenen bu yöntemde, tane boyut dağılımı belirlenecek örnekler hücrede lazer ışınına maruz bırakılır. Tanelerin etrafından geçen ışın, toplayıcı detektörde her tanenin gölgesini oluşturur. Taneler küresel formda oldukları kabulü ile farklı eşdeğer çaplarda gruplandırılır (Hackley ve Ferraris, 2001, Orhan, Özer ve Işık, 2004, Ferraris, Hackley, Aviles ve Buchanan, 2002b).

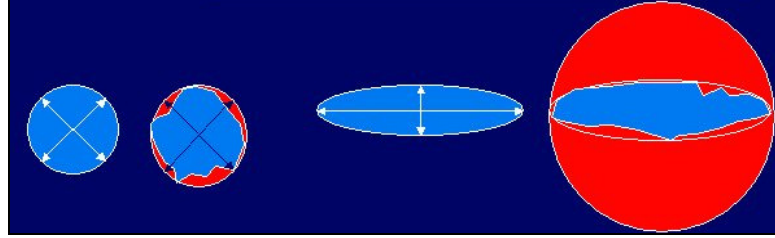


Şekil 2.28 Lazer parçacık analizi çalışma prensibi.

Bugün için parçacık tane boyut dağılımının belirlenmesinde en etkili yöntem lazer difraksiyon dağılımı olmasına rağmen, yöntemin iki önemli dezavantajı söz konusudur:

1. Tanecikler küresel kabul edildiği için küresellikten uzaklaşan şekillere sahip mikro agregalarda hata derecesi artacaktır (Şekil 2.29).

2. Topaklaşma eğilimi olan tozlarda tane boyut dağılımı gerçekte olduğundan daha kaba çıkabilir. Bu tür örneklerde yaş analiz (su veya alkol ortamında) tercih edilmelidir.



Şekil 2.29 Farklı tane şekilleri için lazer parçacık analizinde yapılan hata.

2.2.3.2 Agreg a Boyutunun Küçültülmesinin İslatma Suyu İhtiyacına Etkisi

Klasik beton üretiminde en büyük agreg a tane boyutunu azaltmak, özgül yüzey alanını arttırmak anlamına gelmektedir. Yüzey alanının artması beton işlenebilirliğinin sağlanması için gerekli olan agreg a ıslatma suyu ihtiyacını arttırmaktadır. Bu nedenle klasik uygulamalarda hem dayanım hem de dayanıklılık azalacağından en büyük agreg a tane boyutunu azaltmak tercih edilen bir tasarım hedefi değildir. Öte yandan, son yıllarda etkili akışkanlaştırıcıların geliştirilmesi ve uygulamada kullanılması ile yüzey alanı yüksek, ince tane boyut dağılımına sahip karışımlarda bile, düşük S/Ç oranlarında işlenebilir kıvamda beton üretmek mümkün olabilmektedir. Bu katkılar yardımı ile ince en büyük agreg a tane boyutunu azaltmanın getirdiği kıvam sorunu, su ilavesi yerine akışkanlaştırıcı katkı ilavesi ile mekanik özelliklere zarar vermeden çözülmektedir.

2.2.3.3 Agreg a Boyutu - Birim Yüzey için Gerekli Hamur Hacmi İlişkisi

Klasik beton üretiminde en büyük agreg a tane boyutunu azaltmak, aynı zamanda birim yüzeyi kaplayacak çimento hamuru ihtiyacının artması anlamına gelmektedir. Klasik uygulamalarda çimento hamurunu arttırmanın yolu doğrudan çimento miktarını arttırmak olarak yorumlandığında, ekonomik olarak tercih edilen bir tasarım hedefi olmaktan çıkmaktadır. Ancak, çimento hamurunun miktarını arttırmak yerine, aynı işlenebilirlikteki hamur dayanımını arttırmak alternatif bir yöntem olarak önerilebilir (uygun mineral katkı ve akışkanlaştırıcı seçimi ile). Böylece, agreg a

boyutunun küçültüldüğü bir sistemde, mikro agrega yüzeyinin daha ince bir çimento hamuru tabakası ile kaplanmasının dayanıma yeterli katkıyı sağlaması mümkün olacaktır. Bu durum Şekil 2.30’da verilen örneklerle açıklanabilir. Aynı çimento hamuru hacmi kullanılarak, agregatane boyutu küçültülüp yüzey alanı artırılmış, tanelerin yüzeyini kaplayan çimento hamuru kalınlığı azaltılmıştır.



Şekil 2.30 Agregatane boyutu hamur hacmi ihtiyacı ilişkisi; a) İri agregalı sistem için kesitteki çimento hamuru oranı %30,9, b) Mikro agregalı sistem için %31,9.

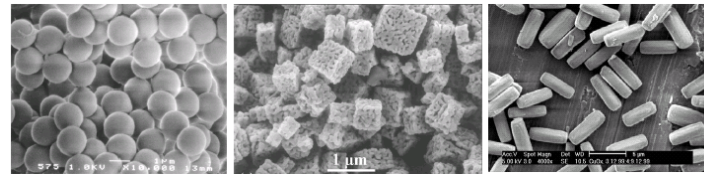
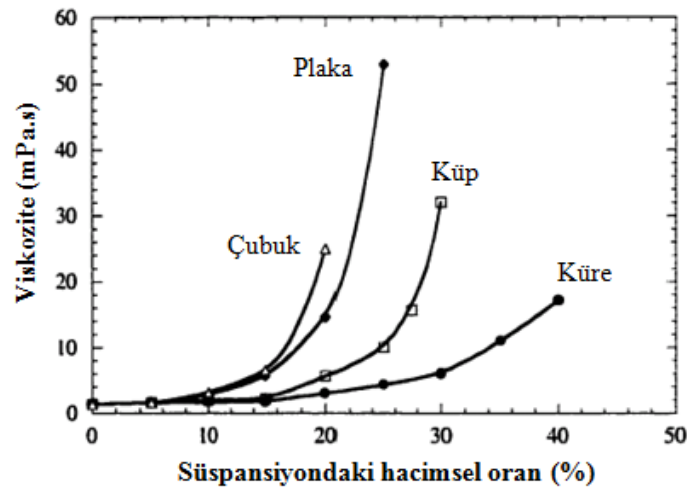
2.2.3.4 Agregatane Boyutunun Küçültülmesinin Heterojenliği Azaltması

Klasik beton tasarımında iri agregatane ve ince agregatane seçilirken, betonun makro boyutta süreklilik gösteren bir tane boyut dağılımına sahip olması amaçlanmaktadır. Bunun nedeni en fazla sıkışma oranını, en az çimento hamuru kullanımı ile sağlamaktır. Bu uygulama, hem teknik hem de ekonomik açıdan uygun bir tasarım felsefesidir. MB’de ise tane boyut dağılımı mikro boyutta süreklilik göstermektedir. Böylece uygun mikro tane boyut dağılımı belirlenerek maksimum sıkışma oranı sağlanabilmektedir. MB’nin karışım tasarımında uygun tane boyut dağılımına sahip mikro agregaların seçimi önemli bir aşamadır. Maksimum sıkışmayı minimum karışım suyu ile sağlayacak bir mikro agregatane dağılımı tercih edilmelidir. Bu aşamada etkili akışkanlaştırıcılardan da taneler arasındaki sürtünme etkisini azaltmak üzere faydalanılabilir. Hamur fazının maksimum sıkışmasını sağlamada değişkenlerin etkileri pek çok çalışmada araştırılmıştır (Ferraris ve Larrard, 1998, Bigas ve Kallias, 2003).

Genel olarak tane geometrisi açısından en etkili parametreler; tane şekli ve yüzey morfolojisi olarak 2 ana grup altında toplanabilir. Şekil özellikleri, mikro betonun reolojik davranışını, ıslatma suyu ihtiyacını, homojenliğini, boşluk yapısını, birim

hacim ağırlığını ve dayanımını önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Tane şekil özellikleri ince agrega ve iri agrega için stereoloji (Stroeven ve Hu, 2006) ve görüntü işleme teknikleri (Erdoğan ve diğer., 2006, Topal, 2008) kullanılarak karakterize edilebilirken, mikro agregaların karakterizasyonu çok daha zor ve karmaşık bir konudur. Çünkü tanelerin boyutu nedeniyle görüntülenmesi hem zordur hem de taneler arasında elektrostatik etkileşimler çok daha etkili olduğu için, tanelerin birbirinden ayıklanması güçtür. Tane şekli karakterizasyonu için genellikle optik mikroskop veya elektron mikroskobuna ihtiyaç duyulmaktadır (Ferraris ve diğer., 2004).

Farklı şekillerde mikro tanecikler içeren çimento hamuru süspansiyonlarında, tane şeklinin viskoziteye etkisi Şekil 2.31’de görülmektedir. Çimento hamuruna %40’a kadar tek boyutlu küre, küp, plaka ve çubuk formunda mikro taneler eklenmesi halinde viskozitedeki değişim tane şeklinin davranışa etkisini ortaya koymaktadır. Çap veya ayrıtları 1-2 mikron mertebelerinde olan örneklerin taramalı elektron mikroskobu fotoğrafları da aynı şekilde verilmiş olup, viskoziteyi en az etkileyen şekil küredir.



Şekil 2.31 Mikro-taneciklerin geometrik şeklinin kullanım oranına göre süspansiyon viskozitesine etkisi (Rawle, 2007)

2.3 Taze Çimento Hamuru ve Harç Reolojisi

Mikro beton tane boyut dağılımı açısından çimento hamuruna benzediği için reolojik özellikleri, çimento hamuru ve harç ile karşılaştırılabilir. Değişik akışkanlıktaki malzemeler kıyaslamalı olarak incelendiğinde, farklı davranışların söz konusu olduğu söylenebilir. Bu davranışlara “*çok akıcı, kohezif, kuru kıvamlı vb.*” gibi subjektif isimler verilebilir. Sözü edilen davranışlar, pek çok klasik işlenebilirlik deneyi ile sayısallaştırılamazken, reolojik incelemeler ile rahatlıkla ayırt edilebilmektedir.

Bu bölümde literatürde yer alan çimento hamuru ve harç reolojisi karakterizasyonuna yönelik çalışmalar sunulacaktır. Ancak öncelikle temel reolojik kavramlar kısaca özetlenecek, farklı geometrik özellikleri olan karıştırıcılara sahip reometrelerin çalışma prensipleri incelenecektir. Sözü edilen karıştırıcıların hangi malzemelerin incelenmesine uygun olduğu tartışılacaktır.

2.3.1 Akışkan Reolojisi, Genel Tanımlar ve Ölçüm Yöntemleri

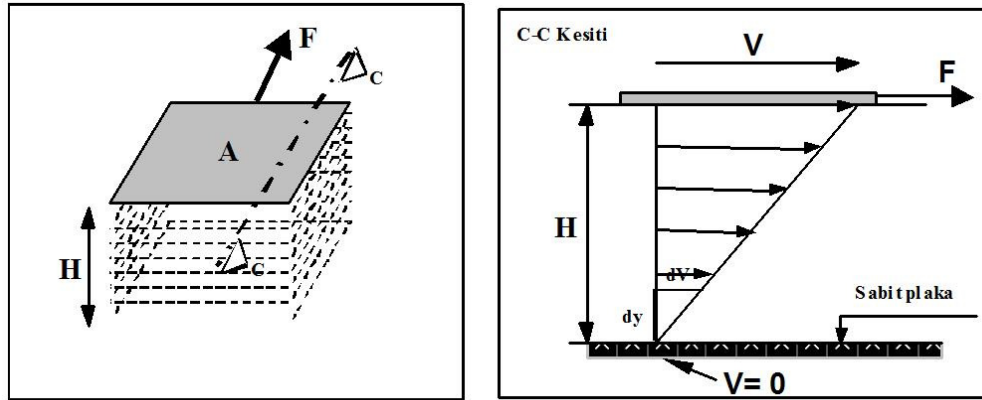
Reoloji, sıvı ve katı malzemelerin yük altında akma ve şekil değiştirme (deformasyon) özelliklerini inceleyen interdisipliner bir bilim dalıdır. Bu çalışmada akışkan özellikli malzemelerin akma davranışları inceleneceği için, sadece akma ile ilgili reolojik parametreler üzerinde durulacaktır. Bir sıvının akma davranışı akma eğrisi yardımıyla belirlenebilir. Akma eğrisi; deformasyon hızı (shear rate, $\dot{\gamma}$) ve kayma gerilmesi (shear stress, τ) arasındaki ilişki veya deformasyon hızı (shear rate, $\dot{\gamma}$) ve viskozite (viscosity, η) arasındaki ilişki olarak ifade edilebilir. Tüm bu parametreler sıvılar için iki plaka modeli ile açıklanmaktadır. Bu modelde iki plaka arası, çok küçük bir açıklık (H) kalacak şekilde ayrılıp malzeme bu bölgeye yerleştirilmiştir. Alt plaka sabittir. Üstte ise V hızı ile A alanına sahip bir plaka, yüzeye paralel F kuvveti uygulanarak hareket ettirilmiştir (Şekil 2.32). Böylece iki plaka arasındaki malzeme hareket etmektedir. Sözü edilen dar açıklıkta akışın doğrusal değiştiği kabulü ile reolojik parametreler aşağıdaki Formül 2.1, 2.2 ve 2.3 yardımıyla elde edilir. Akışkan özellikli malzemeye uygulanan kayma gerilmesi (τ),

deformasyon hızı ($\dot{\gamma}$) ile doğru orantılı olarak artmakta ve bu orantı akışkan malzemenin viskozite katsayısı olmaktadır (η). Formüller elde edilirken, akışkan malzemenin plaka yüzeylerine yapıştığı yani alt plaka yüzeyindeki sıvı moleküllerinin hareketsiz olduğu, kayma (slip) olmadığı varsayılmaktadır. Diğer bir kabul ise, plakalar arasındaki akma gradyanının doğrusal olduğu (laminer bir akış olduğu) yani türbülans meydana gelmediğidir.

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{H} \quad (2.1)$$

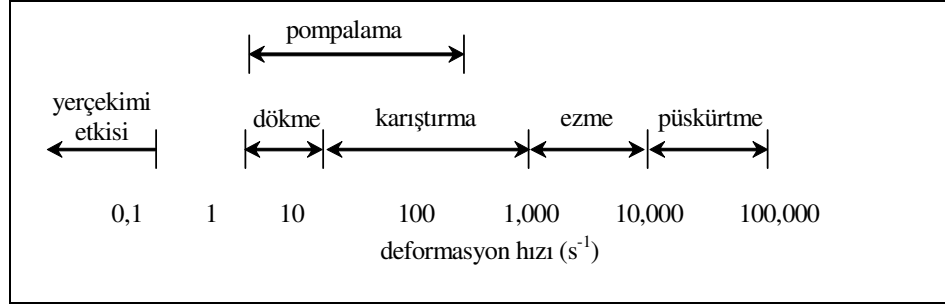
$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.3)$$



Şekil 2.32 Sıvıların reolojik davranışını açıklamakta kullanılan çift plaka modeli.

Deformasyon hızının, pratikte kendi ağırlığı ile hareket etme, karıştırma, pompalama, hızlı çırpma, püskürtme gibi fiziksel karşılıkları vardır. Örneğin, serbest döküşte 1 s^{-1} ila 10 s^{-1} , pompalama halinde ise 1000 s^{-1} değerine yaklaşır. Şekil 2.33’de farklı deformasyon hızlarının uygulamadaki yaklaşık karşılıkları verilmiştir (Saak, Jennings ve Shah, 1999, Saak, 2000). Uygulamada akışkanın, genişliği belli bir açıklıkta maruz kalacağı deformasyon hızı; “Deformasyon hızı = maksimum hız/açıklık genişliği” bağıntısı ile belirlenebilir (Koehler ve Fowler, 2004).



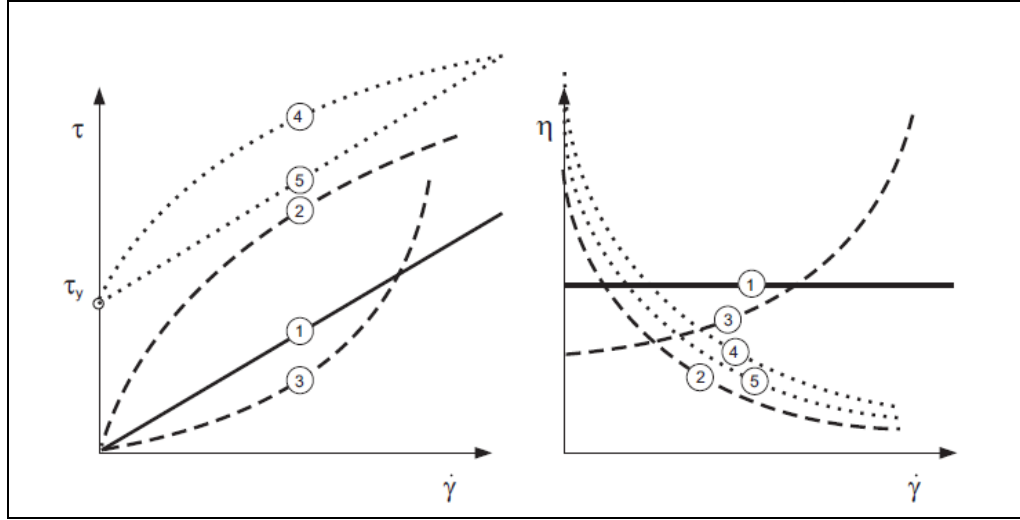
Şekil 2.33 Taze betonun maruz kaldığı farklı deformasyon hızları (Saak, 2000).

Deformasyon hızının değişimi ile reolojik parametrelerin değişimi incelendiğinde, akışkan malzemelerin tipine göre çok basitten çok karmaşığa değişik akma eğrileri elde edilebildiği gözlenmiştir (Şekil 2.34). Bu eğrilerin matematiksel olarak modellenmesi de aynı şekilde çok basit formülasyonlardan çok karmaşığa kadar değişebilmektedir. Sıvılarda temel olarak gözlenen davranışlardan birkaç tanesi, Newtonyen sıvı, non-Newtonyen sıvı, Power kanununa göre deformasyon yumuşaması davranışı gösteren sıvı, Power kanununa göre deformasyon sertleşmesi davranışı gösteren sıvı, eşik kayma değeri olan Bingham sıvısı, eşik kayma gerilmesi olan ve deformasyon yumuşaması gösteren sıvı, eşik kayma gerilmesi olan ve deformasyon sertleşmesi gösteren sıvı olarak sıralanabilir (Schatzmann, 2005). Şekil 2.34’de bu malzemelerin olası akma eğrileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bunların yanında daha farklı davranışlar da söz konusu olup, bu davranışların gözlemlendiği maddeler ve bunlara en uygun matematiksel modeller literatürde mevcuttur (Schatzmann, 2005). Akma eğrileri aynı malzeme için çalışılacak deformasyon hızı aralığına göre davranışın değişebileceğini göstermektedir. Bu açıdan akma eğrilerinin yorumlanması ile pek çok malzeme pratikte önemli kullanım alanları bulmaktadır.

Newtonyen sıvılarda akma eğrisi lineer bir fonksiyon ile simgelenmektedir:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2.4)$$

Bu formülde Newtonyen viskozite sabittir. Su, yağ, gliserin ve süt örnek olarak verilebilir.



Şekil 2.34 Farklı özellikteki sıvılar için akma eğrileri, 1. Newtonyen sıvı, 2. Deformasyon yumuşaması davranışı gösteren sıvılar, 3. Deformasyon sertleşmesi davranışı gösteren sıvılar, 4. Eşik kayma gerilmeli deformasyon yumuşaması davranışı gösteren sıvılar, 5. Bingham sıvısı.

Newtonyen olmayan sıvılar ise Power kanununa uyan sıvılar ve eşik kayma değerli sıvılar olarak iki gruba ayrılabilir. Power kanuna uyan sıvılarda akma eğrisi üstel bir fonksiyon ile simgelenmektedir:

$$\tau = m \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2.5)$$

burada m kıvam katsayısı, n ise Power kanunu üs endeksi olarak adlandırılmaktadır. Power kanununa göre eğer $n < 1$ ise sıvı deformasyon yumuşaması göstermekte, $n > 1$ ise sıvı deformasyon sertleşmesi göstermektedir. Deformasyon yumuşaması gösteren malzemelere örnek olarak polimer eriyikleri ve şampuanlar, deformasyon sertleşmesi gösteren malzemelere örnek olarak ise; yüksek konsantrasyonlu su-nişasta karışımları ve seramik hamurları verilebilir.

Eşik kayma değerli sıvılarda, bir eşik kayma gerilmesi değeri mevcuttur (τ_0). Bu değer aşılmadan sıvının harekete geçmesi mümkün değildir. Eğer uygulanan gerilme, eşik kayma gerilmesi değerinden düşük ise akış meydana gelmez. Bu tür sıvıların akma eğrileri çoğunlukla Herschel-Bulkley veya Casson modelleri ile formülize edilir. Herschel-Bulkley modeline göre:

$$\tau = \tau_o + m \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2.6)$$

bu formülde m “Herschel-Bulkley kıvam katsayısı”, n ise “Herschel-Bulkley indeksi” olarak tanımlanmaktadır. Herschel-Bulkley modelinin basitleştirilmiş şekli Bingham sıvısı olarak tanımlanabilir (sabit viskoziteli eşik kayma gerilmeli sıvı davranışı). Bingham sıvısı için $n=1$ ve $m = \eta_B$ (η_B : Bingham viskozitesi) olmakta ve formül;

$$\tau = \tau_o + \eta_B \cdot \dot{\gamma} \quad (2.7)$$

şeklinde yazılmaktadır. Ancak pratikte pek çok sıvıda deformasyon hızı değişimi ile viskozite değişkenlik gösterdiğinden Bingham modeli basitleştirilmiş, teorik bir modeldir.

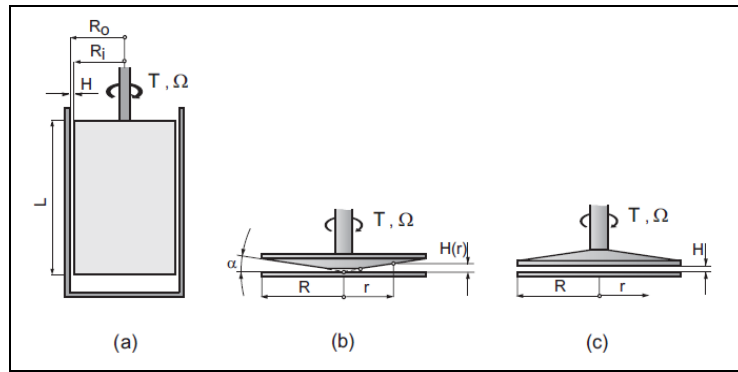
Casson modeli ise Formül 2.8 ile simgelenmekte olup, buradaki μ_c ; Casson viskozite parametresidir. Herschel-Bulkley modeli süspansiyonlarda, Casson modeli ise yoğurt, domates püresi, sıcak çikolata ve kanın reolojik davranışının modellenmesinde kullanılmaktadır.

$$(\tau)^{0.5} = (\tau_o)^{0.5} + (\mu_c \cdot \dot{\gamma})^{0.5} \quad (2.8)$$

Yukarıda sözü edilen tüm modeller teorik olarak sıvıların davranışını, çift plaka modelini dikkate alarak temsil etmektedir. Akış gradyanının doğrusal olması ve sıvı bünyesinde katı tanecik olmaması prensibi geçerlidir.

Reometrelerde temel prensip, reolojik özellikleri ölçülecek malzemeye bir kayma gerilmesi uygulamak ve meydana gelen deformasyonu ölçmek veya tersi yöntem kullanılarak belirli deformasyon hızında malzemenin kaymaya gösterdiği direncin ölçümüdür. İkinci yöntem daha sık kullanılmaktadır. Malzemeye uygulanan kayma gerilmesi veya deformasyon etkilerine karşı malzemenin tepkisi zamanla değişmekte olduğu için bu büyüklükler zamana bağlı olarak tanımlanmalıdır. Değişim şiddeti malzeme özelliklerine bağlı olduğu kadar, uygulanan etkinin yönü ve şiddetine de

bağlıdır. Uygulanan kayma gerilmesinin malzemeye nasıl bir geometrideki karıştırıcı ile etki ettirildiği, bünyesinde katı tanecik barındıran sıvılarda oldukça önemlidir. Reolojik özelliklerin tespitinde kullanılan reometreler rotasyonel ve osilatör olmak üzere iki grupta toplanabilir. Rotasyonel reometreler sürekli tek yönde hareket ederken, osilatör tipi reometreler iki yönde de hareket etmektedir. Tez kapsamında sadece rotasyonel reometreler kullanılmıştır. Rotasyonel reometrelerde kullanılan hareketli mil veya diğer bir deyişle karıştırıcı (spindle) çift plaka teorisine uygun olarak iki plaka arasındaki kaymayı sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Lineer akış için iki plaka arasında laminar akışı sağlamak gerekmektedir. Bu amaçla; a) iç içe iki silindir (Concentric Cylinder System-CCS), b) koni-plaka (Cone Plate System-CPS) veya iki paralel plaka (Paralel Plate System-PPS) kullanılır (Şekil 2.35). Çoğunlukla içi içe silindirlere içteki, koni plakada koni, paralel plakada ise üstteki plaka dönmektedir. Kayma gerilmesinin olduğu açıklığa (H), incelenen malzeme doldurulur. Sıvıda doğrusal bir kayma gradyanı oluşması için bu açıklık çok dar olmalıdır (Ferraris, 1999a, 1999b, Hackley ve Ferraris, 2001, Koehler ve Fowler, 2004, Westerholm, Lagerblad ve Forssberg, 2007). Öngörülen dönüş hızında (Ω) meydana gelen moment (T) ölçülerek veriler toplanır. Farklı reometrelerin geometrilerine bağlı olarak çok geniş aralıklarda elde edilebilen T ve Ω değerleri iki plaka modelindeki τ ve $\dot{\gamma}$ büyüklüklerine dönüştürülebilir. Reometrelerin motor kapasiteleri, ölçülecek parametrelerin limitlerini belirlemektedir. Bu ölçümlerle gerçeğe en yakın reolojik büyüklükler elde edilir, çünkü doğrusal kayma gradyanı yakalanmış olur.



Şekil 2.35 Çift plaka teorisinin geçerli olduğu reometre mili konfigürasyonları, a) iç içe iki silindir, b) koni-plaka, c) iki paralel plaka.

İç içe silindir sistemi için reolojik parametreler Formül 2.9 ve 2.10 ile hesaplanabilir:

$$\dot{\gamma} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Omega \cdot R_i}{R_o - R_i} \quad (2.9)$$

$$\tau = \frac{T}{2 \cdot \pi \cdot R_i^2 \cdot L} \quad (2.10)$$

burada R_i iç silindirin çapı, R_o : dış silindirin çapı, L: iç silindirin uzunluğudur.

Koni-plaka sisteminde ise Formül 2.11 ve 2.12 ile deformasyon hızı ve kayma gerilmesi değerleri elde edilmektedir:

$$\dot{\gamma} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Omega \cdot r}{H(r)} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Omega}{\tan \alpha} \quad (2.11)$$

$$\tau = \frac{3 \cdot T}{2 \cdot \pi \cdot R^3} \quad (2.12)$$

burada R koninin ve tabandaki plakanın çapı, α ise koninin tabanla yaptığı açıdır.

Paralel plaka sisteminde elde edilecek τ ve $\dot{\gamma}$ parametreleri plaka çapının bir fonksiyonudur. Reolojik parametreler plakanın en dış yüzeyindeki bölgeye kadar ($r = R$) tanımlanmaktadır:

$$\dot{\gamma}(R) = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Omega \cdot R}{H} \quad (2.13)$$

$$\tau(R) = \frac{3 \cdot T}{2 \cdot \pi \cdot R^3} + \frac{\dot{\gamma}(R)}{2 \cdot \pi \cdot R^3} \cdot \frac{dT}{d\dot{\gamma}(R)} \quad (2.14)$$

İç içe silindir, koni-plaka ve paralel plaka sistemlerinin kullanıldığı reometrelerde hem açıklıklar çok küçüktür (50 mikron – 2,5 mm arası) hem de kullanılan malzeme

miktarları mililitre-santilitre mertebelerindedir. İç içe silindir kullanılan bir reometrenin silindir yarıçapları arasındaki oranın 1,1 olması akışın laminar olması için bir ön koşuldur (Ferraris, 1999b). Ayrıca yarıçaplar arasındaki fark (açıklık) en büyük tane boyutunun 5 katı olmalıdır. Örneğin en büyük tane boyutu 10 mm olan bir karışım için iç çapı 500 mm, dış çapı da 550 mm olan bir reometre gerekecektir. Bu durumda teorik olarak sadece mikronize tane çaplı katı taneciklerin bulunduğu süspansiyonlar söz konusu reometreler için uygundur. Uygulamada ise kolloidal sıvıların dışında, bünyesinde yüksek oranda katı tanecikler içeren süspansiyonların bu tür reometrelerde ölçümü tavsiye edilmez. Çünkü her zaman askıdaki katı taneciklerin ayrışma ve laminar akımı bozma riski vardır. Yukarıda incelenen tüm geometrilere görüleceği üzere, bu tür reometrelerde içinde katı tanecikler barındıran malzemelerin ölçülmesi hem sağlıklı değildir, hem de katı tanecikler plakalar arasında sıkışarak reometreye zarar verebilir. Örneğin koni - plaka sistemde alt uca bir katı tanecik gelmesi hareketi aniden durdurabilir.

2.3.2 Katı Tanecik İçeren Süspansiyonların Reolojik Davranışları

Bir önceki bölümde, katı parçacıklar içermeyen sıvıların akma davranışlarını incelemeye yönelik çalışmalar verilmişti. Bu bölümde katı taneciklerin mevcudiyeti durumunda davranışın nasıl değiştiği ve incelemenin nasıl yapılması gerektiği üzerinde durulacaktır. Katı taneciklerin askıda olduğu, hareket ettiği veya çökeldiği bir süspansiyonda reolojik parametrelerin bulunması sıvılara kıyasla çok daha güçtür. Katı taneciklerin birbiri ile olan temasının yarattığı sürtünme, reolojik parametreleri önemli derecede etkilemektedir.

Süspansiyonların viskozitesini kontrol eden, tanecikler arasındaki kuvvetler olup, bu kuvvetler üç grupta toplanabilir (Koehler ve Fowler, 2004):

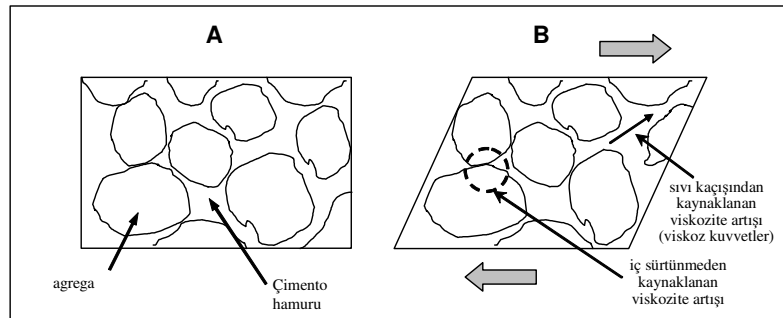
1. *Kolloidal parçacık etkileşim kuvvetleri*: Süspansiyonun katı fazını oluşturan, parçacıklar arasındaki çekme veya itme kuvvetleridir. Çekim kuvvetleri Van der Waals kuvvetlerinden veya zıt elektrostatik yüzey yükünden kaynaklanabilir. İtme kuvvetleri ise sterik itki veya benzer elektrostatik yüzey yükü kaynaklıdır. Her iki kuvvet de aynı anda etkiyerek karmaşık bir davranışa yol açmaktadır. Çekim

kuvvetleri topaklaşmaya neden olur, ancak kayma gerilmesi etki ettiğinde bu topaklaşma bozulur. Kayma gerilmesi kaldırıldığında tekrar topaklanma meydana gelir. Bu davranış “tikotropi” adı ile anılmaktadır. Topaklaşan bir sistemde viskozite artmaktadır. Diğer taraftan itme kuvvetleri ise disperse olmuş bir sisteme zemin hazırlamaktadır. Böyle bir sistemde viskoziteyi doğrudan katı tanecik konsantrasyonu belirlemektedir.

2. *Brownian kuvvetleri*: Bu kuvvetler tane boyutu 1 mikronun altındaki taneciklerde ortaya çıkan kuvvetlerdir. Taneciklerin rastgele kendi eksenini etrafındaki dönüşünden kaynaklanmaktadır. Beton gibi iri agreganın hacimsel oranının yüksek olduğu sistemlerde ihmal edilebilir.

3. *Viskoz kuvvetler*: Viskoz kuvvetler, parçacıklar ve içinde sürüklendiği sıvı arasındaki yerel hız farklılıkları ile doğru orantılıdır. Süspansiyon sıvı fazındaki viskozite değişimi, süspansiyonun da viskozitesini etkilemektedir.

Noguchi, Oh ve Tomosawa (1999), çimento hamurunun, agregaların yüzeyini belirli kalınlıkta film tabakası ile sarması halinde, agregalar arasında en düşük iç sürtünme kuvvetlerinin (parçacık etkileşim kuvvetleri) oluşacağını ortaya koymuştur. Hareketsiz taze betonda (Şekil 2.36-A), agregaları saran film tabakası yetersizse, herhangi bir kayma gerilmesine maruz kalması halinde, taze betonun viskozitesi hızla yükselecektir. Bu olayın nedenleri; Şekil 2.36-B’de görüldüğü gibi, agregataneleri arasındaki içsel sürtünme ve kenetlenen agregaların arasından çimento hamuru kaçışıdır. Aynı araştırmacılar, teorik hesaplarla, optimum film tabakası kalınlığını ve minimum hamur hacmini önermişlerdir.



Şekil 2.36 Çimento harcında parçacıklar arası etkileşim kuvvetleri.

İri taneler içeren süspansiyonlarda reometre kavramının tamamen değişmesi gerekmektedir. Teorik olarak iki plaka arasında dar bir açıklıkta hareket, bu tür malzemelerde;

- çeperlerde ayrışma ile kayma (wall slip),
- türbülanslı akıma yol açma (heterojen akma profili),
- lokal sıkışma-tıkanma

gibi sorunlar ortaya çıkarmaktadır (Ferraris, 1999a). Tanecikler sürekli ve rastgele yer değiştirmekte olduğundan lineer akış olanaksız hale gelmektedir. Tüm bu sorunlar nedeniyle katı tanecik içeren süspansiyonlarda, reometre veya viskozimetrelerin çift plaka olmaksızın kullanımı gündeme gelmektedir. Ya da çift plaka arasındaki açıklık, katı tanelerin rahatça tıkanmadan ilerleyebileceği genişlikte tasarlanmaktadır. Ancak sözü edilen tasarımlar beton gibi çok iri katı tanecikler içeren karışımlarda, iç içe silindirler kullanıldığı zaman çok büyük boyutlara ulaşmaktadır. Bu amaçla; çap/açıklık oranı, ölçüm hacmi, reometre karıştırıcısının geometrisi vb. pek çok değişkeni etkileyen tasarımlar üzerinde çok sayıda inceleme yapılmıştır (Coussot ve Piau, 1995, Nielsen, 2002, Schatzmann, 2005, Sağlam ve Özkul, 2006). Şekil 2.37a’da bu örneklerden birisi görülmektedir. En büyük tane boyutu 25 mm olan ve hacimce %64 agrega içeren beton karışımı ile yapılan denemelerde, çok düşük devir sayılarında bile (0,052 devir/saniye) lineer akış gözlenememiştir. Taze beton yüzeyine bırakılan konfetilerin lineer olarak yerleştirilmesinden 5 saniye ve 35 saniye sonraki yerleri Şekil 2.37b ve 2.37c’de görüldüğü gibi lineerlikten sapmıştır (Coussot ve Piau, 1995).

Çift plaka olmaksızın yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar yarı ampirik olup, moment-dönüş hızı ilişkisi modellerde kullanılmaktadır. Ampirik bağıntılarla veya dönüşüm katsayıları kullanılarak, kayma gerilmesi-deformasyon hızı ilişkisine ulaşılmaktadır. Bu tür reometrelerde geleneksel reometrelerdeki gibi dar açıklıklar arasında akma yoktur ve “rölatif reometre” olarak adlandırılırlar (Koehler ve Fowler, 2004). Rölatif reometrelerde sadece karıştırıcı belli bir dönüş hızında sıvı içinde dönmektedir. Moment – dönüş hızı ilişkisi elde edilmektedir (Formül 2.15). Rölatif

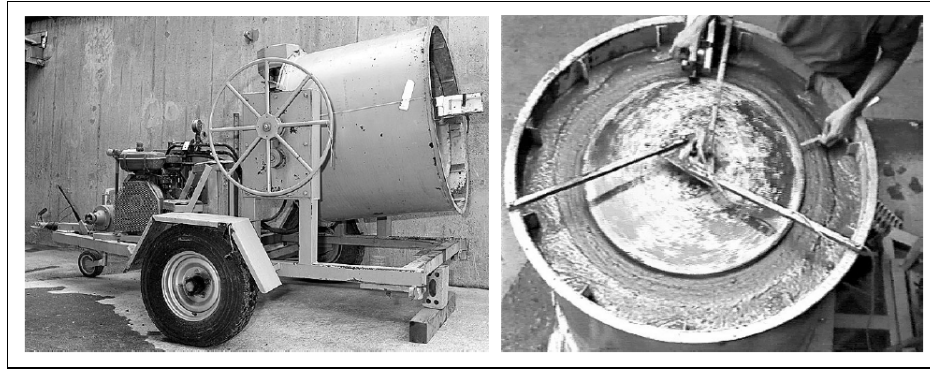
reometrelerden elde edilen sonuçlar, geleneksel reometrelerle elde edilen kalibrasyon katsayıları ile dönüştürülür ya da doğrudan “moment - dönme hızı” ilişkisi ile ifade edilir. Ferraris (1999b), sıvının türbülanslı akışı ve karıştırıcının geometrisi nedeniyle, rölatif reometrelerden elde edilen kalibrasyonun her zaman çözüm olmayabileceğini belirtmiştir. Özellikle silindir formundaki karıştırıcılarda, pürüzsüz silindir yüzeyinde lokal ayrışma nedeniyle reolojik parametreler olduğundan düşük ölçülebilmektedir (Şekil 2.38a). Zira silindir kendi eksenini etrafında hızla dönerken, süspansiyonun sürekli aynı bölgesine kayma gerilmesi uygulamaktadır. Zaman içinde silindir yüzeyinin pürüzsüz olması “kayma (slip)” problemini ortaya çıkarmaktadır. “Slip” etkisi reometrenin kayma gerilmesini malzemeye uygulayan yüzeyinde zaman içinde su birikmesi ve bu bölgenin davranışının malzeme davranışından uzaklaşması olarak tanımlanabilir (Saak, Jennings ve Shah, 2001). “Slip” problemini elimine etmek için yüzeyde pürüzlendirme yapılmaktadır. Literatürde bunun “slip”i elimine ettiği söylenmekte, ancak bazı farklı görüşler de bulunmaktadır. Silindir yüzeyini pürüzlendirmek, bu problemi azaltmaya yönelik olarak önerilse de Roussel ve Lanos (2003) yüzeyi pürüzlendirmenin kesin bir çözüm olmadığını belirtmektedir (Şekil 2.38b). Şekil 2.39’da ise iç içe geçen silindirlere sabit olanına kaymayı engelleyici parçalar ilave edilmesi bu problemi azaltmak için kullanılmaktadır (Wallevik, 2003). Slip problemini önlemek için değişik geometrik şekillerdeki bıçak plakalar da (vane tipi) karıştırıcı olarak kullanılmaktadır (Şekil 2.40). Laminer akım yerine türbülanslı akımın olduğu bıçak plakalı reometrelerde, kayma gerilmesinin sürekli karışımın aynı bölgesine etkimesi önlenmiş olur (Saak ve diğer., 2001). Dinamik etkiden kaynaklanacak lokal ayrışma engellenir. Bıçak plakalı karıştırıcıdan elde edilen sonuçlar, gerçek reolojik parametreler olmayıp, moment (T) - dönme hızı (N) ilişkisinden elde edilmiş bağıntılardır:

$$T = g + N \cdot h \quad (2.15)$$

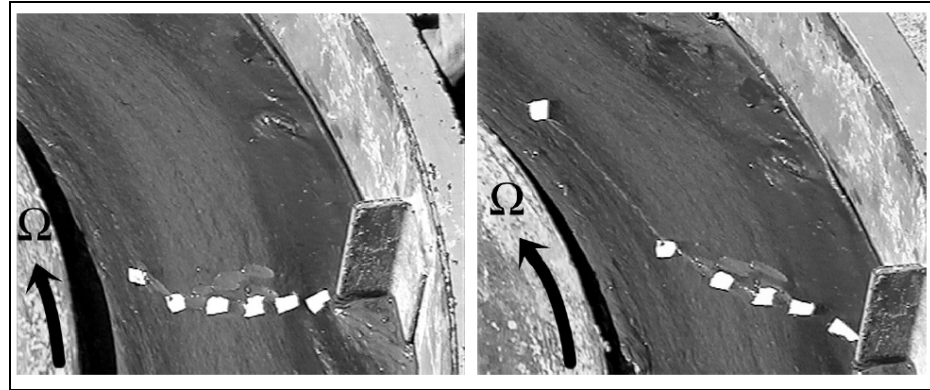
burada g (N.mm) ve h (N.mm.s) sabitleri sırasıyla τ_o ve η ile ilişkilendirilir.

Silindirik ya da bıçak plakalı karıştırıcıların kullanıldığı reometrelerin yanında, bilyeli reometreler de katı tanecikler içeren karışımların reolojik özelliklerini

incelemede kullanılabilir (Müler, Tyrach ve Brunn, 1999, Koehler ve Fowler, 2004, Schatzmann, 2005, Kaufmann, Winnefeld, Hasselbarth ve Trindler, 2006). Tez kapsamında özellikle çimento hamuru ve harcı için geliştirilmiş bilyeli bir reometre kullanıldığından, bu sistem özellikleri üzerinde ayrıntılı biçimde durulacaktır. Söz konusu reometre sistemi yardımıyla, tanecik içeren karışımların akma eğrileri ve diğer reolojik parametreleri elde edilmektedir. Daha önce açıklanan sistemlerde, kayma gerilmesi plakaların yüzeyinde oluşturulurken, burada “sürüklenme akışı” (drag flow) meydana gelmektedir (Şekil 2.41). Bu nedenle klasik kayma akışı (shear flow) ile “sürüklenme akışı” (drag flow) arasındaki ilişki belirlenmelidir.



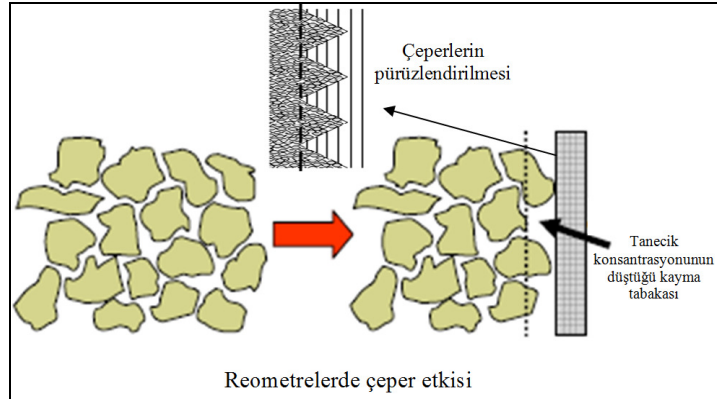
(a)



(b)

(c)

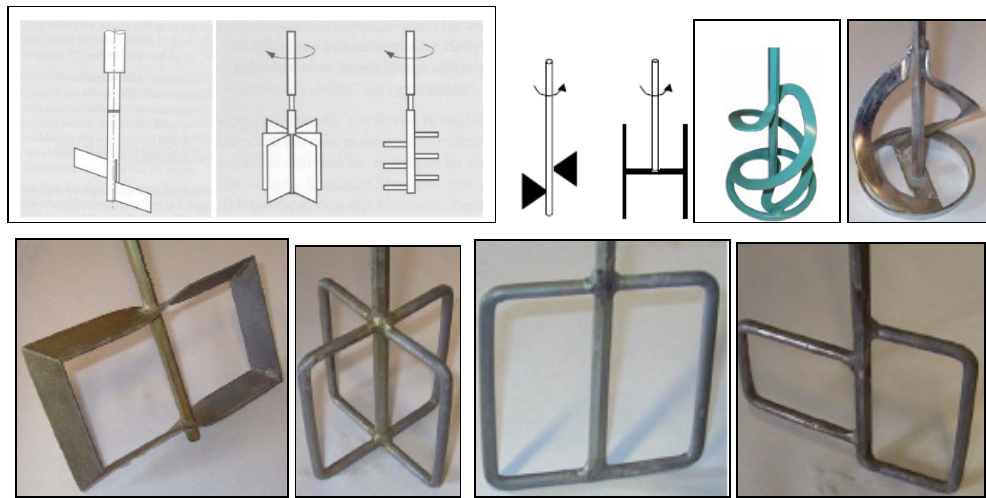
Şekil 2.37 Taze beton reometresi (Coussot ve Piau, 1995), ve taze beton yüzeyine konfetilerin lineer olarak yerleştirilmesinden 5 saniye sonra (b), 35 saniye sonraki (c) yerleri.



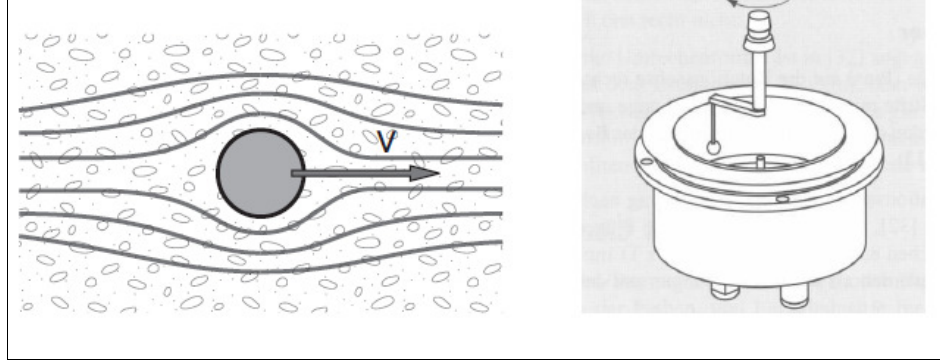
Şekil 2.38 Pürüzsüz silindir yüzeyinde slip problemi nedeniyle viskozite düşüşü (Roussel ve Lanos, 2003, Koehler ve Fowler, 2004).



Şekil 2.39 Dış veya iç silindirde yapılan eklemelerle kayma (slip) etkisini azaltma çabaları (Wallevik, 2003).



Şekil 2.40 Farklı geometrilere bıçak plakalı (vane) karıştırıcılar (Koehler ve Fowler, 2004, Schatzmann, 2005).

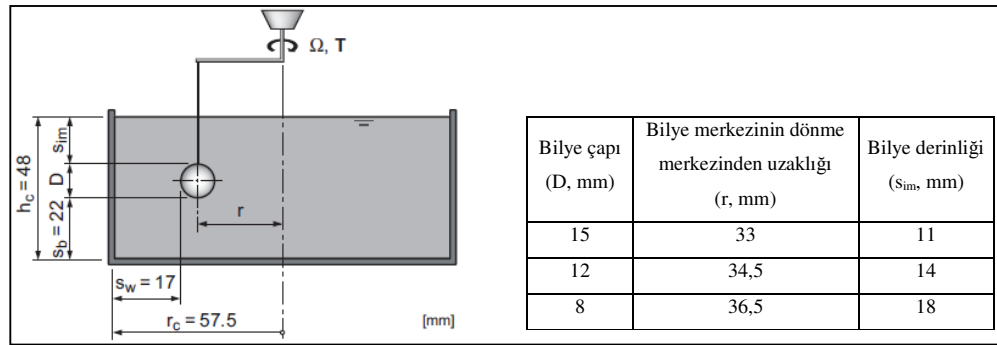


Şekil 2.41 Bilyeli reometrede bilyenin sürüklenme akışı (Schatzmann, 2005).

Bilyeli ölçüm sistemi (Ball measuring system), paslanmaz çelik bir kürenin belli hacimdeki bir kaba doldurulan taze numune içinde dairesel olarak dönmesi esnasında dönme hızı ve moment ölçümü prensibine dayanır. Bilyenin geometrik özellikleri merkezden uzaklığı sabittir ve dönüş hızı değiştirilerek farklı deformasyon hızlarına (shear rate) ulaşılabilir (Şekil 2.42). İki farklı modda çalışmak mümkündür. İlk mod olan deformasyon kontrollü sistemde (Controlled shear rate, CSR), istenen deformasyon hızı ve uygulanma süresi programlanarak, sözü edilen deformasyon hızlarında bilyenin ve bilyenin bağlı olduğu kolun maruz kaldığı anlık moment (T) (Bilyenin malzeme içinde sürüklenmesi esnasında meydana gelen moment) ve hız değerleri (Ω) veri olarak toplanır. Bu değerler çeşitli teoriler yardımı ile kayma gerilmesi ve deformasyon hızına dönüştürülür. Böylece akma eğrisi (flow curve) grafiği ile reolojik davranış ortaya konulmaktadır. Sözü edilen teorilerden ilki Tyrach (2001) tarafından geliştirilmiş ve bazı araştırmalarda kullanılmıştır (Lauger, Müller ve Tyrach, 1999, Leemann ve Winnefeld, 2007, Schatzmann, Fischer ve Bezzola, 2003). Bu teori, deformasyon hızı ($\dot{\gamma}$) ile bilyenin dönüş hızı (Ω) arasında doğrusal bir ilişki olduğu kabulü ile, kayma gerilmesi (τ) ile bilyenin etrafındaki laminar akış nedeniyle maruz kaldığı moment (T) arasında da doğrusal bir ilişki olduğu prensibine dayanır. Tyrach (2001) doğrusal katsayılarla dönüşüm yapmış olup, bu dönüşümde Newtonyen ve Power kanunu sıvıları için kullanılan formüllerden yararlanmıştır. Ancak, Schatzmann (2005), yaptığı deneysel çalışmalarda teorinin iki sorunu olduğunu belirlemiştir. Bu sorunların birincisi farklı çaptaki bilyelerle yapılan ölçümlerde akma eğrilerinin değiştiği, ikincisi ise bilye etrafında laminar akış (Reynolds sayısı (Re) <1) üzerindeki akış hızlarında sonuçlardaki değişkenliğin

artmıştır. Schatzmann bu sorunların çözümüne yönelik yaptığı çalışmalarda yeni bir teori geliştirerek, teorisinin pratikte de geçerliliğini kanıtlamıştır. Günümüzde, 2005 yılında Schatzmann tarafından geliştirilen yarı ampirik teori kullanılmaktadır. Daha önceki teorilerden farklı olarak, Schatzmann incelenecek malzemenin Newtonyen, Newtonyen olmayan (Non-Newtonyen, Power) veya eşik kayma gerilmeli non-Newtonyen olma durumlarına göre ayrı ayrı dönüşüm katsayıları belirlemiştir. Böylece kullanılan dönüşüm modellemesi farklı reolojik davranışlar için daha kullanışlı ve gerçeğe daha yakın hale gelmektedir. Ayrıca bu teori, önceki dönüşüm modellerinde olmayan, hem laminar akım ($Re < 1$) hem de türbülanslı davranışa geçiş bölgesini ($1 < Re < 100$) de dikkate almaktadır.

Bilyeli reometrede, bilye bir turu tamamlaması sırasında, sürekli olarak daha önce hiç kayma gerilmesi görmemiş karışımın içinde sürüklenmektedir. Bu sırada alınan ölçümler karışımın örselenmemiş halini modellemede oldukça yararlıdır. Diğer reometre karıştırıcılarında bir tur çok çabuk tamamlandığı için bu tür bir ölçüm söz konusu değildir. Ayrıca bilyenin ilk sürüklendiği bölgeye tekrar gelişi zaman aldığından ve açtığı boşluğu akıcı özellikteki bir karışım tekrar doldurduğundan slip problemi düşük deformasyon hızlarında ortadan kalkmaktadır.



Şekil 2.42 Bilyeli reometrenin geometrik özellikleri (Schatzmann, 2005).

Schatzmann (2005) yaklaşımı, Metzner-Otto (1957) teorisi kullanılarak geliştirilmiştir. Dönüşüm hesaplamaları üç aşamadan oluşmaktadır:

1. Bilyeli ölçüm sisteminin sistem katsayısının (C) belirlenmesi,

2. Bilyenin dönüş hızı (Ω) ile deformasyon hızı ($\dot{\gamma}$) arasındaki ilişkinin belirlenmesi,

3. Bilyenin karışım içinde sürüklenirken maruz kaldığı moment (T) ile kayma gerilmesi (τ) arasındaki ilişkinin belirlenmesi.

1. Bilyeli ölçüm sisteminin sistem katsayısının (C) belirlenmesi

Sabit bir dönüş hızında (Ω) bir sıvı içinde hareket halindeki bilyenin enerjisi (P) aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$P = T \cdot 2 \cdot \pi \cdot \Omega \quad (2.16)$$

Windhab (2001) boyutsuz bir enerji katsayısını (Newton sayısı - Ne) aşağıdaki formülle tanımlamıştır:

$$Ne = \frac{P}{\Omega^3 \cdot D^5 \cdot \rho} = \frac{T \cdot 2 \cdot \pi}{\Omega^2 \cdot D^5 \cdot \rho} \quad (2.17)$$

burada D: bilyenin çapı, ρ ise bilyenin içinde sürüklendiği malzemenin yoğunluğudur.

Akışkanlar mekaniğinde **Reynolds sayısı**, bilyeye etkiyen, atalet kuvvetlerinin (hız*yoğunluk) viskoz kuvvetlere (viskozite/kuvvet kolu) olan oranıdır. Sonuç olarak bu değer, söz konusu iki tip kuvvetin belli bir akış şartı altında birbirine göre göreceli önemini verir. Bu nedenle, Reynolds sayısı, düzgün akış ve türbülanslı akış gibi değişik akış rejimlerini nitelemek için kullanılır. Reynolds katsayısı şu şekilde formülize edilmektedir:

$$Re = 2 \cdot \pi \cdot \frac{\Omega \cdot r \cdot D \cdot \rho}{\eta} \quad (2.18)$$

burada r bilye merkezinin dönme merkezinden uzaklığı, η ise bilyenin içinde sürüklendiği malzemenin viskozite katsayısıdır.

Newton sayısı ile Reynolds sayısı çarpılarak bilyeli sistemin karakteristik C katsayısı elde edilir:

$$C = Re \cdot Ne = 4 \cdot \pi^2 \cdot \frac{T}{\Omega} \cdot \frac{r}{D^4} \cdot \frac{1}{\eta} \quad (2.19)$$

Farklı özellikteki kalibrasyon sıvıları ile C sistem katsayıları ampirik olarak belirlenmiştir. Sistem katsayısı $Re \leq 1$ için sabit bir değer alırken, $Re > 1$ durumunda laminar akıştan türbülanslı akışa geçildiği için artmaktadır. Türbülanslı akış için Reynolds sayısı farklı katsayılarla çarpılarak sistem katsayısı elde edilmektedir. Kalibrasyon sıvıları ile yapılan deneylerden elde edilen katsayılar Tablo 2.1’de 8-12 ve 15 mm’lik bilyeler için verilmiştir (Schatzmann, 2005).

Tablo 2.1 Farklı çaptaki bilyeler için laminar ve türbülanslı sürüklenme durumunda sistem katsayıları

Bilye çapı	$Re \leq 1$ $C_1 = \text{sabit}$	$Re > 1$ $C_1 = \sum_{j=0}^{j=4} a_j \cdot Re^j$				
		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
D (mm)	-					
15	46775,9	$4,44 \cdot 10^{-4}$	1308,4	5,8868	-0,077994	0,00014926
12	113384,6	$1,05 \cdot 10^{-5}$	4843,6	-20,678	0,065062	-0,00024068
8	491381,6	$4,60 \cdot 10^{-5}$	20743	87,252	-4,9636	0,036844

2. Bilyenin dönüş hızı (Ω) ile deformasyon hızı ($\dot{\gamma}$) arasındaki ilişkinin belirlenmesi

Bilyeli reometrede viskozite aşağıdaki formülle verilebilir:

$$\eta = 4 \cdot \pi^2 \cdot \frac{T}{\Omega} \cdot \frac{r}{D^4} \cdot \frac{1}{C_1} \quad (2.20)$$

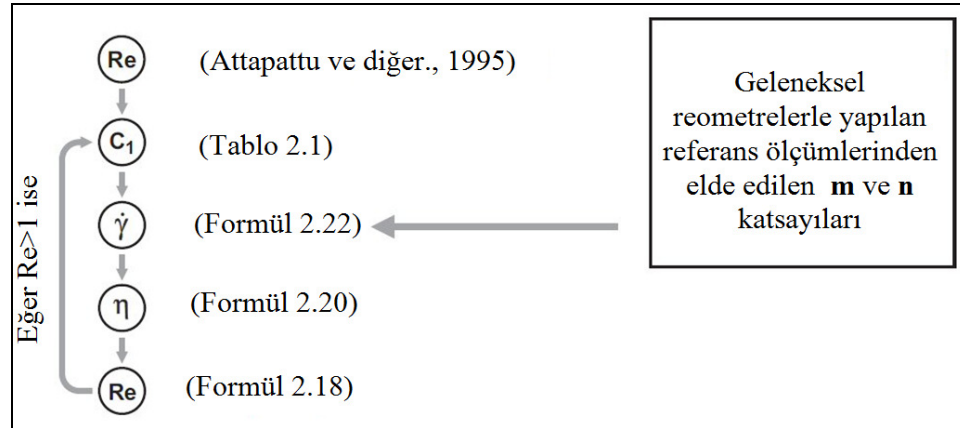
Power kanununa uyan sıvılar için teorik olarak viskozite;

$$\eta = m \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.21)$$

olup, bu iki denklem bir araya getirilirse deformasyon hızı şu şekilde ifade edilebilir:

$$\dot{\gamma} = \left(4 \cdot \pi^2 \cdot \frac{T}{\Omega} \cdot \frac{r}{D^4} \cdot \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{m} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad (2.22)$$

Power kanununa uyan çeşitli kalibrasyon sıvıları yardımıyla m ve n katsayıları belirlenmiştir. Bilyeli ölçüm sistemi ile T ve Ω değerleri ölçülmektedir. C sistem katsayısı ise Tablo 2.1'den alınacaktır. Böylece ilk yaklaşım için deformasyon hızı belirlenecektir. Ancak Tablo'daki C katsayısı için bilinmeyen Viskozite ve Reynolds sayılarına ihtiyaç vardır. Reynolds sayısının önceden kestirilip ilk yaklaşımın yapılması gerekmektedir. Bu amaçla Atapattu ve diğerlerinin (1995) Reynolds sayısı yaklaşımı kullanılmıştır. İlk yaklaşımdan elde edilen Reynolds sayısı ile deformasyon hızı ($\dot{\gamma}$) ve viskozite tekrar hesaplanır. Eğer yeniden hesaplanan Re katsayısı 1'den küçükse hesaplama durur. Eğer 1'den büyükse sırasıyla C , $\dot{\gamma}$, $\eta = m \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$ ve Re defalarca iterasyonla hesaplanır (Şekil 2.43). Hesaplanan değerler arasında fark çok azalınca iterasyon tamamlanır ve türbülanslı akış için deformasyon hızı elde edilir.



Şekil 2.43 Bilyeli ölçüm sisteminde deformasyon hızının laminar ve türbülanslı akış için tespiti.

Eşik kayma gerilmeli (EKG) sıvılar için de benzer bir yöntem kullanılmaktadır. Herschel Bulkley Modeline göre viskozite şu şekilde formülize edilebilir:

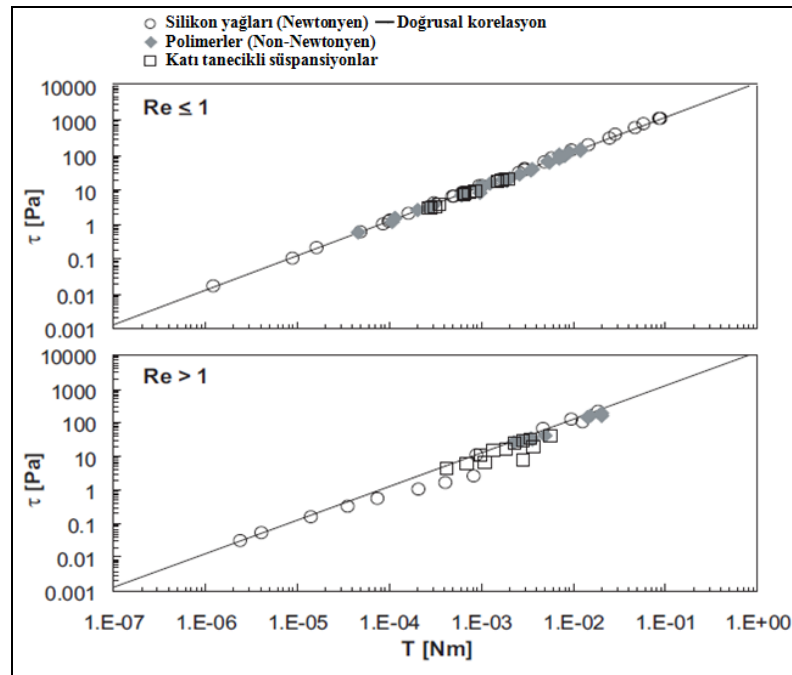
$$\eta = \frac{\tau_y + m \cdot \dot{\gamma}^n}{\dot{\gamma}} \quad (2.22)$$

$$\eta = \frac{\tau_y + m \cdot \dot{\gamma}^n}{\dot{\gamma}} = 4 \cdot \pi^2 \cdot \frac{T}{\Omega} \cdot \frac{r}{D^4} \cdot \frac{1}{C_1} \quad (2.23)$$

Formülden iterasyonla $\dot{\gamma}$ 'nin tespit edilmekte ve tüm dönme hızlarında bu işlemin yapılıp $\dot{\gamma} - \Omega$ ilişkisi çıkartılmaktadır.

3. Moment ile kayma gerilmesi arasındaki ilişkinin belirlenmesi ($T - \tau$)

Üç farklı karakteristik özellikteki malzeme için ilişki ayrı ayrı belirlenmiştir. Reolojik özellikleri bilinen Newtonyen sıvılar, Power kanununa uyan sıvılar ve Eşik kayma gerilmeli süspansiyonlar kullanılmıştır. Eşik kayma gerilmeli süspansiyonlarda katı madde oranı farklı olan kil süspansiyonları ile çalışılmıştır. Re sayısının 1'den küçük veya büyük olması için moment ve kayma gerilmesi ilişkisi Şekil 2.44'de verilmiştir (Schatzmann, 2005).



Şekil 2.44 Laminer ve türbülanslı akış için moment ile kayma gerilmesi arasındaki ilişki ($D=15$ mm çaplı bilye için) (Schatzmann, 2005).

Laminer akış halinde ölçüm sonucu elde edilen moment değerleri ile sıvıların eşik kayma gerilmeleri arasında doğrusal bir ilişki olup, sabit K_T katsayısı ile dönüşüm yapılmaktadır:

$$\tau = K_T \cdot T \quad (2.24)$$

K_T katsayısı tüm örneklerin ortalaması alınarak belirlenmiştir (Tablo 2.2). Diğer taraftan türbülanslı akışa geçiş bölgesinde ($Re > 1$) ilişki doğrusallıktan saptığı için, kayma gerilmesi aşağıdaki denklemle, Reynolds sayısına bağlı olarak belirlenmektedir.

$$\tau = [k_1 + k_2 \cdot e^{(-k_3 \cdot Re)}] \cdot T \quad (2.25)$$

k_1 , k_2 ve k_3 katsayıları en küçük kareler yöntemiyle hesaplanmıştır (Tablo 2.3).

Tablo 2.2 Laminer akış durumunda K_T katsayıları ve değişkenlik katsayıları.

$Re \leq 1$:	Newtonyen ve Power kanununa uyan sıvılar	Değişkenlik katsayısı	Eşik kayma gerilmeli süspansiyonlar	Değişkenlik katsayısı
D (mm)	K_T (m^{-3})	(%)	K_T (m^{-3})	(%)
15	12600	3,8	10700	3,5
12	14900	3,2	15000	4,5
8	18500	2,9	22800	5,4

Tablo 2.3 Türbülanslı akış durumunda k katsayıları ve değişkenlik katsayıları.

$Re > 1$:	D (mm)	Katsayılar			Değişkenlik katsayısı		
		k_1 (m^{-3})	k_2 (m^{-3})	k_3 (-)	k_1 (%)	k_2 (%)	k_3 (%)
Newtonyen sıvılar	15	3094	10052	0,033435	10,5	3,3	9,9
	12	3975	11379	0,043100	7,1	2,6	7,9
	8	5553	13910	0,052913	13,7	5,7	16,5
Non-Newtonyen sıvılar	15	8513	4254	0,115740	9,4	20,7	51,8
	12	4927	9440	0,036701	126,9	62,8	109,9
	8	8068	10873	0,167510	14,3	13,1	34,6
Katı tanecikler içeren süspansiyon	15	2293	8377	0,009679	17,2	4,6	10,3
	12	6603	8790	0,021948	15,2	10,8	27,0
	8	11172	11635	0,055850	10,4	9,8	27,0

2.3.3 Çimento Hamuru ve Harç Reolojisi Karakterizasyonu

Bir önceki bölümde sunulan yöntemler ile çimento hamuru ve harç karışımlarının reolojik davranışları pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bunlar arasında önemli literatür taramaları; Ferraris, Larrard ve Martys (2001), Koehler ve Fowler (2004)'den incelenebilir. Literatürde bu konuda yapılan çalışmaları, çimento hamuru ve harç reolojisini etkileyen faktörlere göre, aşağıdaki şekilde üç grupta toplamak mümkündür. Her çalışmada kendine özgü yöntem ve malzeme kullanıldığı dikkate alındığında, bu çalışmaları ayrıntılı şekilde sunmak ve birbiri ile karşılaştırmanın oldukça büyük yer kaplayacağı görülmektedir. Bu nedenle güncel ve önemli görülen çalışmaların atıflanması ile yetinilmiştir.

1. Malzeme ve karışım bileşenleri ile ilişkili değişkenlerin incelendiği çalışmalar:

Su/çimento oranı (Azeredo, Morel ve Lamarque, 2008), çimento kimyasal kompozisyonu (Vikan, Justnes, Winnefeld ve Figi, 2007) çimento, puzolanlar ve diğer ince malzemelerin tane boyutu, morfolojisi, özgül ağırlığı (Quiroga ve Fowler, 2004, Cortes, Kim, Palomina ve Santamarina, 2008, Collins ve Sanjayan, 1999, Sedran, 2000, Saak, 2000, Yücel, 2006), ince agrega oranı ve tipinin etkisi (Ferraris ve Larrard, 1998, Nehdi, Mindess ve Aitcin, 1998, Nielsen, 2002, Westelholm, Lagerblad ve Forssberg, 2007, Yammime ve diğer., 2008, Westelholm, Lagerblad, Silwerbrand ve Forssberg, 2008, Lu, Wang ve Rudolphi, 2008), akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkıların etkisi (Cyr, Legrand ve Mouret, 2000, Wallevik, 2003, Sedran, 2000, Hanehara ve Yamada, 2008, Papo ve Piani, 2004), priz ayarlayıcı katkıların etkisi (Aiad, Mohammed ve El Enein, 2003), viskozite arttırıcı katkıların etkisi (Sonebi, 2006, Phan, Chaouche ve Moranville, 2006, Schwartzentruber, Roy ve Cordin, 2006, Leemann ve Winnefeld, 2007, Şahmaran ve diğer., 2008), liflerin etkisi (Kuder, Özyurt, Mu ve Shah, 2006, Kaufmann, Winnefeld, Hesselbarth ve Trindler, 2006).

2. Ortam koşullarının etkilerinin incelendiği çalışmalar:

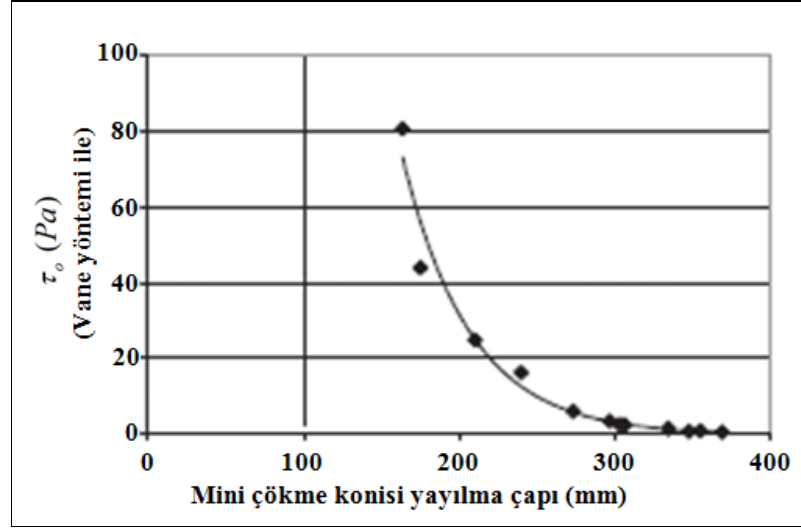
Sıcaklık ve nem kaybının etkisi (Caszewski ve Szabowski, 2004, Altable ve Casanova, 2006, Schwartzentruber ve diğer., 2006).

3. Ölçüm sisteminin etkilerinin incelendiği çalışmalar:

Karıştırma koşulları ve karıştırıcı mikser tipinin etkisi (Williams, Saak ve Jennings, 1999, Aiad, 2003, Chopin, Larrard ve Cazacliu, 2004), reolojik parametrelerin ölçüm yöntemlerinin ve reometre karıştırıcısının geometrisinin etkisi (Ferraris, 1999a, Nehdi ve Rahman, 2004, Banfill ve Frias, 2006, Bauer, Sousa, Guimaraes ve Silva, 2006, Phan ve diğer., 2006, Paiva, Silva, Labrincha ve Ferreira, 2006, Yücel, 2006, Barrak, Mouret, Bascoul, 2009).

2.3.3.1 Çimento Hamuru ve Harçta Reolojik Parametrelerin Dolaylı Yollardan Ölçümüne Yönelik Çalışmalar

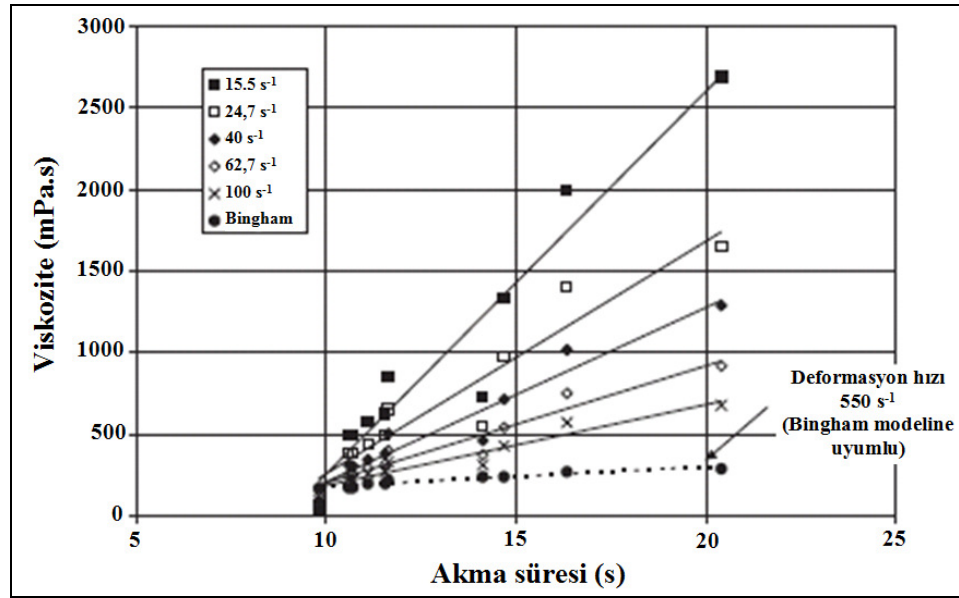
Reometrelerin maliyetinin yüksek olması ve sahada kullanım olanaklarının kısıtlılığı nedeniyle, çimento hamuru ve harç karışımlarının reolojik davranışlarının incelenmesinde alternatif yöntemlerin kullanımı gündeme gelmektedir. Pek çok araştırmacı bu konuda farklı alternatifler önermekte ve her yöntemin kendine özgü avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Schwartzentruber ve diğer. (2006), taze çimento hamuru karışımlarında kendiliğinden yerleşen kıvamdaki örnekler üzerinde yaptıkları çalışmada, Bingham modelinde sözü edilen reolojik parametrelerle (sırasıyla eşik kayma direnci ve plastik viskozite) mini çökme konisi nihai yayılma çapıyla ve mini V-hunisi akış süresi arasında ilişki olduğunu deneysel olarak göstermiştir (Şekil 2.45-2.46). Benzer deneysel çalışmalarda bu sonucu destekleyen bulgular elde edilmiştir (Ferraris, Obla ve Hill, 2001, Şahmaran ve diğer., 2008). Şekil 2.45’de kendiliğinden yerleşen özellikteki karışımlar üzerinde, Vane tipi bir reometre kullanılarak yapılan eşik kayma direnci ölçüm sonuçları ile aynı karışımların mini çökme konisi arasındaki ilişki görülmektedir. Aradaki ilişki, eşik kayma direnci artışı ile karışımın yayılma çapının azaldığını açıkça ortaya koymaktadır. Roussel ve Coussot (2005)’da mini çökme hunisi yayılma çapı ile eşik kayma gerilmesi arasında ilişki olduğunu çeşitli modelleme teknikleri yardımıyla göstermiştir. Ancak bu modellemede tiksotropinin etkisi dikkate alınmadığı özellikle vurgulanmalıdır. Ayrıca mini-çökme hunisinin yukarı kaldırma hızı (ivmelenme), karışımın yayıldığı yüzeyin yüzey enerjisi ve pürüzlülük (sürtünme katsayısı) özellikleri de ihmal edilmektedir (Roussel, 2007).



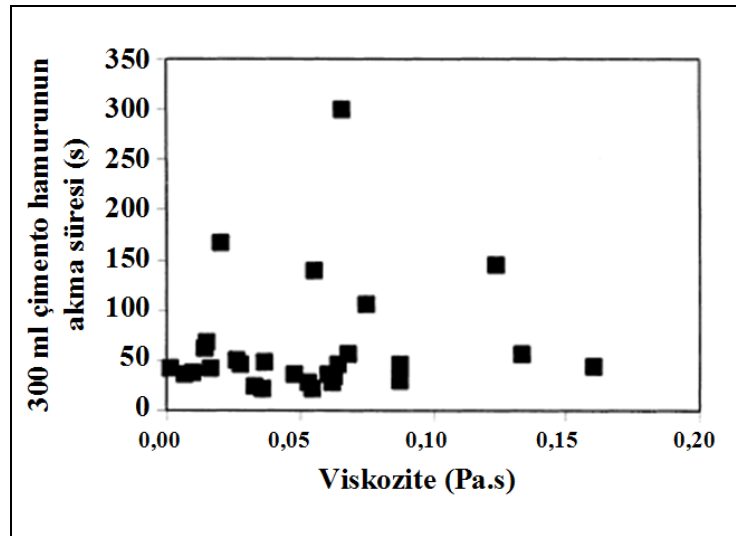
Şekil 2.45 Kendiliğinden yerleşen çimento hamuru örneklerinin mini çökme konisi yayılma çapı ile eşik kayma direnci arasındaki ilişki (Schwartzentruber ve diğer., 2006).

Şekil 2.46'da ise, aynı karışımların farklı deformasyon hızlarında ölçülen plastik viskozite değerleri ile mini V-hunisi akış süreleri arasındaki ilişkiler gösterilmiştir. Plastik viskozite deformasyon hızına göre değişmekle beraber, Bingham modeli kabulü yapıldığında yüksek deformasyon hızlarında dahi akış süresi ile doğrusal bir korelasyon gösterdiği belirlenmiştir. Mini V-hunisi akış süresiyle, taze çimento hamurunun yayılma hızı arasında bir ilişki kurmak mümkündür (Schwartzentruber ve diğer., 2006). Ancak tersi sonuçlar elde edilen çalışmalar da mevcuttur (Ferraris, Obla ve Hill, 2001).

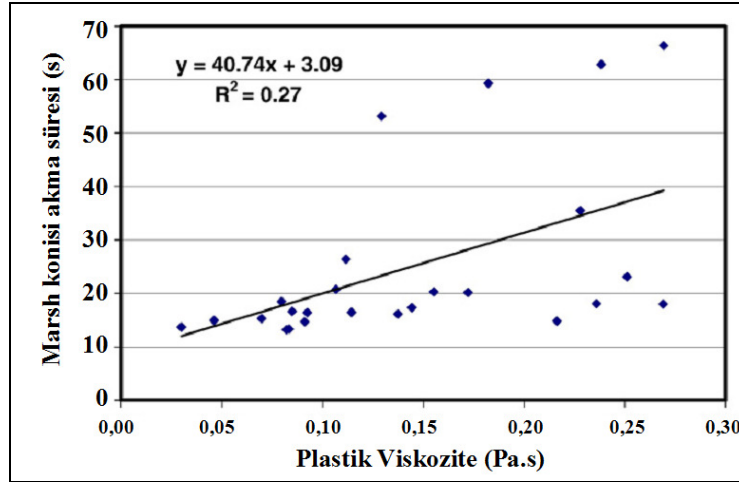
Ferraris ve diğer. (2001), V-hunisine benzeyen Marsh konisi ile mineral katkı içeren çimento hamurları üzerinde yaptığı çalışmalarda reometreden elde edilen viskozite değerleri ile Marsh konisi değerleri arasında güçlü bir ilişki olmadığını belirlemiştir (Şekil 2.47). Benzer sonuçlar doğal zeolitin, çimento şerbeti viskozitesine etkisini inceleyen Şahmaran ve diğer. (2008) tarafından da Şekil 2.48'deki gibi elde edilmiştir. Her iki çalışmada da çok farklı Marsh hunisi akış süreleri veren karışımların reometrede aynı viskozite değerini verdikleri görülmektedir. Bunun nedeni reometredeki slip etkisinin ölçülen viskoziteyi etkilemesi olabilir.



Şekil 2.46 Kendiliğinden yerleşen çimento hamuru örneklerinin mini V hunisi akış süresi ile plastik viskozite değerleri (deformasyon hızı 15,5, 24,7, 40, 62,7, 100, 500s⁻¹ için) arasındaki ilişki (Schwartzentruber ve diğer., 2006).



Şekil 2.47 Marsh konisi ile mineral katkı içeren çimento hamurları üzerinde yapılan çalışmalarda reometreden elde edilen viskozite değerleri ile Marsh konisi değerleri arasındaki ilişki (Ferraris ve diğer., 2001).



Şekil 2.48 Marsh konisi ile zeolit içeren çimento hamurları üzerinde yapılan çalışmalarda reometreden elde edilen viskozite değerleri ile Marsh konisi değerleri arasındaki ilişki (Şahmaran ve diğer., 2008).

Öte yandan Roussel ve Cussigh (2008), tiksotropik davranış gösteren, kendiliğinden yerleşen beton üzerinde yaptıkları çalışmalarda, tiksotropinin karışım oranlarından etkilenebileceğini belirterek pratikteki olası sakıncaları üzerinde durmuşlardır. Aynı zamanda literatürde tane boyutunu küçültmenin tiksotropi derecesini arttırdığı vurgulanmaktadır (Roussel, Roy ve Coussot, 2004, Felekoğlu, Tosun, Baradan ve Altun, 2006, Roussel ve Cussigh, 2008, Lu, Wang ve Rudolph, 2008). Sözü edilen güncel çalışmalar, basit deney yöntemleri ile reolojik parametrelerin kestirilmesi ve karışımların bu parametreler açısından uygun tasarlanması üzerine yoğunlaşmaktadır. Özetle basit deney yöntemleri ile reolojik parametrelerin kestirilmesi gelişmekte olan bir konudur ve tezin deneysel çalışmalar bölümünde bu konu üzerinde durulacaktır.

2.4 Çimento Bazlı Kompozitlerde Tokluk Özelliklerini Geliştirmeye Yönelik Çalışmalar

Çimento bazlı kompozitlerde mikro-lif kullanımı, tokluk performansını geliştirme ve çatlak hassasiyetini azaltma amacıyla en sık kullanılan yöntemdir. Bu bölümde çimento bazlı kompozitlerde gerilmenin kaynakları, çatlak hassasiyetini azaltmaya

yönelik olarak alınacak önlemler özetlenmiştir. Ayrıca çimento bazlı kompozitlerde kullanılan mikro-lif türleri ve kompozitteki performansları ile ilgili çalışmalar sunulmuştur.

2.4.1 Çimento Bazlı Kompozitlerde Gerilme Kaynakları ve Çatlak Hassasiyeti

Çimento bazlı kompozitlerin gevrek yapısı bu malzemelerin pek çok alanda donatısız kullanımının önüne geçmektedir. Günümüzde modern beton teknolojisinde hedeflenen yüksek dayanım aynı zamanda özellikle erken yaşlarda çatlak hassasiyetini arttırmaktadır (Pease, 2005). Yüksek dayanımlı betonlarda çatlak hassasiyetini arttıran temel etkenler; 1) Erken yaşlarda yüksek otojen büzülme, 2) Yüksek rijitlik, 3) Artan kırılgenlik, 4) Azalan gevşeme ve sünme kapasitesi.

Özellikle tamir amaçlı uygulamalarda iri agreganın sistemden çıkartılması yukarıda sıralanan etkenleri daha da belirgin hale getirmektedir. Çimento bazlı kompozitlerin maruz kalabileceği gerilmeler çok çeşitlidir. Bu gerilmeler;

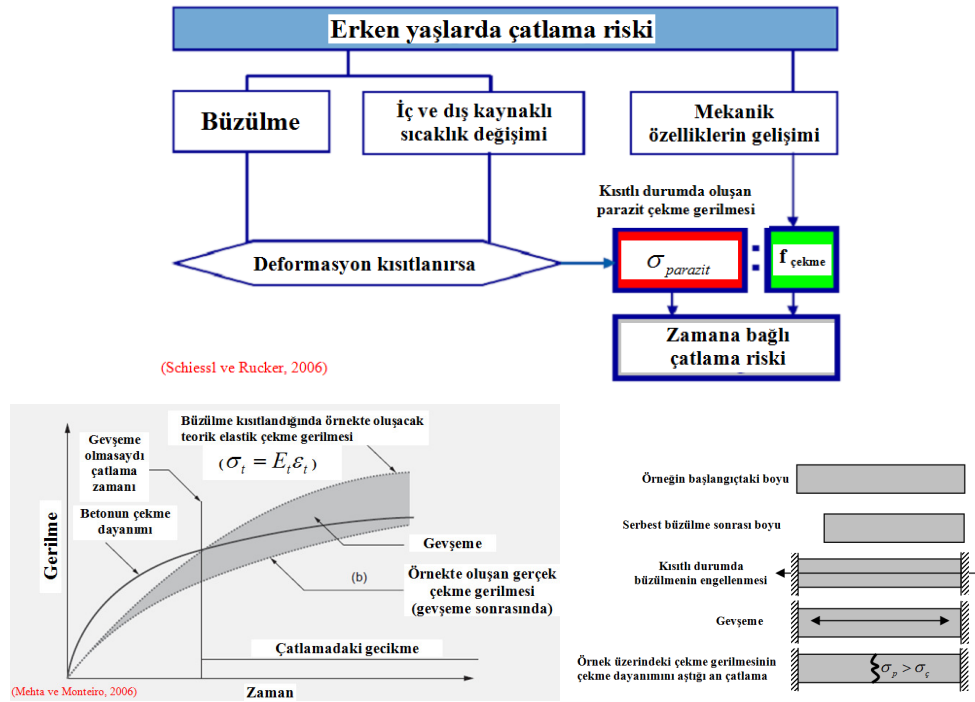
1. Büzülme kaynaklı gerilmeler (eski beton-yeni tamir harcı birlikte çalışma uyumsuzluğu),
2. Sıcaklık değişimi veya ıslanma kuruma kaynaklı gerilmeler,
3. Servis yükleri kaynaklı gerilmeler,
4. Tasarım hatalarının veya farklı oturmaların yarattığı parazit gerilmeler,

olarak gruplandırılabilir. Çimento bazlı kompozitlerin bünyesinde, büzülme kaynaklı veya sıcaklık değişiminden oluşacak gerilmeler, kısıtlı durumlarında kompozitin elastisite modülü ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Elastisite modülü değerini azaltmak bu açıdan çatlak riskini azaltmada önemli bir yoldur. Ancak elastisite modülünün azaltılması, kompozitin mekanik özelliklerini de azaltacağı için, kompozitin çekme dayanımı da eşzamanlı olarak düşecektir. Ayrıca kompozitin gevşeme kapasitesi (sabit deformasyon etkisinde iç gerilmenin zamanla azalması), çatlak oluşup oluşmayacağını, oluşacak ise ne zaman oluşacağını belirlemektedir (Ramyar, 2002, Lin ve Kishi, 2006). Çatlak oluşmaması için aşağıdaki koşulun

gerçekleşmesi gerekir. Bu koşul sürekli sağlanırsa, teorik olarak çatlak meydana gelmemektedir (Şekil 2.49).

$$\sigma_{parazit} = f(\varepsilon_{büzülme}, \varepsilon_{sicaklik}) \cdot E_{kompozit} - \sigma_{gevseme} < \sigma_{\zeta} \quad (2.26)$$

Bu formüldeki ε değerleri kompozitte serbest halde çeşitli nedenlerle meydana gelen şekil değişimleri olarak verilmiştir.



Şekil 2.49 Çimento bazlı kompozitlerde kısıtlı durumda çatlamanın kaynağı.

Formül 2.26'daki eşitsizliği sağlayıcı her türlü etki çatlak hassasiyetini azaltmada etkili olacaktır. Örneğin erken yaşlarda kür ile nem kaybını önlemek, hem çekme dayanımı (σ_{ζ}) gelişimini olumlu etkileyecek (kurumanın yaratacağı kılcal çatlakları önleme), hem de toplam büzülmeyi azaltarak parazit gerilme şiddetini düşürecektir. Literatürde çatlak hassasiyetini azaltmaya yönelik olarak mineral katkı kullanımı, düşük hidratasyon ısılı çimento kullanımı, genleşen karakterde ürün oluşturan malzemelerin kullanımı, suya doygun hafif agrega kullanımı, vb. pek çok alternatif vardır (Kamen, Denaire, Sadouki ve Brühwiller, baskıda, Mönnig ve Reinhardt,

2006, Craeye ve Schutter, 2006, Akçay ve Taşdemir, 2008, Qi ve diğer., 2002, Lura, Mazotta, Rajabipour ve Weiss, 2006). Bu alternatifler bir sonraki bölümde incelenecektir.

Çatlağı önlemede etkin bir rolü olan gevşemenin, malzeme bünyesinde oluşan parazit gerilmeyi ne mertebelere indirebileceği araştırma konusu olmuştur. Çimento bazlı malzemelerin gevşeme kapasiteleri malzeme bileşenlerine oldukça bağlı olmakla birlikte, normal beton için yapılan çalışmalarda bazı sonuçlara ulaşılmıştır. Bu çalışmalarda Hooke yasasına göre bulunan teorik gerilmenin, gevşeme etkisi ile birlikte yaklaşık üç kat azaldığı belirlenmiştir. Diğer bir deyişle, betonda oluşacak parazit çekme gerilmesi, serbest büzülme halindeki deformasyon ile elastisite modülünün çarpımının üçte biri kadar olacaktır (Beushausen ve Alexander, 2007).

Çimento bazlı kompozitler tamir-onarım amacıyla eski beton tabaka üzerine uygulanacaksa, boyutsal stabilite için eski beton ile uygulanacak kompozitin termal genleşme katsayılarının ve elastisite modüllerinin benzer olması uyumluluk açısından gereklidir (Beushausen ve Alexander, 2007).

Çimento bazlı kompozitlerin gevrek yapısının çeşitli türdeki mikronize liflerle azaltılması, çatlak hassasiyetini azaltma açısından diğer bir yoldur. Lifler kompozitin çekme deformasyon kapasitesini arttırmakta, böylece çatlak hassasiyetini azaltmaktadır. Uygun mekanik ve fiziksel özelliklere sahip lifler, yüksek gerilme seviyelerinde bile matrisle uyumlu çalışarak çatlak riskini azaltmakta, kompozitin elastik davranış gösterdiği deformasyon seviyelerini arttırabilmektedir. Hatta çatlak genişliğini kısıtlama, çatlağı yayma gibi tokluk arttırıcı özellikler lifler sayesinde kompozite kazandırılabilir. Liflerin, kompozitin elastisite modülünü de bir miktar azaltmaları söz konusu olduğu için, bu açıdan da fayda sağlamaktadırlar.

2.4.2 Çimento Bazlı Kompozitlerde Kullanılan Liflerin Özellikleri

Çimento bazlı kompozitlerde kullanılan mikro-lifler kökenine göre doğal, metalik, polimerik, karbon ve cam kökenli olarak gruplandırılabilir. Her lifin geometrik

özelliklerinin yanında (enkesit formuna bağlı olarak çap veya enkesit ayrıtları, boy), fiziksel özellikleri (yoğunluk, yüzey pürüzlülüğü, ergime noktası) ve mekanik özellikleri (çekme dayanımı, elastisite modülü, kopma uzaması) kompozitteki performansını etkilemektedir. Tablo 2.4’de özellikle lifli tamir harcı veya yüksek performanslı kompozit üretiminde kullanılan farklı kökenli liflerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin hangi mertebelerde olduğu karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Kanda ve Li, 1999, Kim, Naaman, El-Tawil, 2008, Chen ve Liu, 2003, Song, Hwang ve Sheu, 2005, Santos, Rincon, Romero ve Talero, 2005, Fu, Lu ve Chung, 1998, Karacan, 2006, Katz, Li ve Kazmer, 1995, Li ve Obla, 1994, Sett ve Vipulanandan, 2004). Lifli mikro beton tasarımında yoğunlukla boyu 10-15 mm’yi geçmeyen polimer kökenli lifler tercih edildiği için, daha çok bu liflerle ilgili bilgiler sunulacaktır.

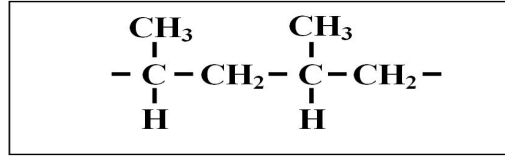
Tablo 2.4 Farklı kökenlerdeki harç liflerinin fiziksel ve mekanik özellikleri

Lif türü		Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime sıcaklığı (°C)	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)	Elastisite modülü (GPa)	Boy (mm)	Çap veya enkesit ayrıtı ile ilgili farklılıklar
Metallik lifler	Çelik	7,8	-	1000-2500	0-4	220-240	3-15	100-200 mikron, dikdörtgen kesitli olabilir. boykesit eksenli boyunca burulmuş olabilir (Kim, Naaman, El-Tawil, 2008)
Polimerik lifler	Polipropilen	0,9-1	160-165	300-700	10-50	3-5	5-15	- 10-400 mikron arasında çaplı
	Yüksek yoğunluklu polietilen	0,97	-	2610-2770	2-4	80-120	10-15	- dikdörtgen enkesitte (Santos ve diğer., 2005)
	Naylon	1,16-1,14	225-250	900		5-5,2	5-15	- çoklu sarmal formda
	Polivinil alkol	1,3	230	1200	6-8	25-45	8-15	(fibrillated)
Karbon lifler		1,6-1,8	-	400-5000	0,5-2	7-400	3-15	1-50 mikron
Alkali dirençli cam lifleri		2,55-2,60	-	2500		80	3-10	1-5 mikron

* Harç üretimi için uygun olanlar verilmiştir. Beton için olan iri liflerde farklı geometrik konfigürasyonlar bulunabilir.

Polipropilen (PP) lifler: Polipropilen [(C₃H₆)_x] olefin grubuna giren termoplastik bir polimerdir (Şekil 2.50). Hidrofob (su itici) bir yüzey yapısı vardır. Yoğunluğu 0,9-1 g/cm³ ve ergime sıcaklığı da 160-165°C civarında olan polipropilen, lif üretiminde kullanılan diğer polimerlere kıyasla mekanik özellikler açısından daha zayıftır. Polipropilen liflerin hidrofob yüzeyleri nedeniyle çimento bazlı matrisle

aderansı çok kuvvetli değildir. Çekme dayanımı 300-700 MPa arasında değişmektedir. Elastisite modülü de oldukça düşük olup (3-5 GPa), kopma uzaması çok yüksektir (%10-20) (Topçu ve Canbaz, 2007).



Şekil 2.50 Polipropilenin $[(C_3H_6)_x]$ molekül yapısı.

Polipropilen lifler çimento bazlı kompozitlerde özellikle plastik büzülme kaynaklı çatlak riskinin azaltılmasında kullanılmaktadır. Kullanım oranları toplam hacmin %0,1-0,5'i arasında değişmektedir. Kullanım oranı arttıkça plastik büzülme çatlaklarını önleme etkinliği artmaktadır (Banthia ve Gupta, 2006, Qi ve diğer., 2002). Betonda daha yüksek oranda kullanımı halinde, önemli işlenebilirlik sorunlarına neden olduğu için tavsiye edilmez (Sanjuan ve Moragues, 1997). Betonun erken yaşlardaki elastisite modülü düşük olduğu için etkili olabilen polipropilen lifler, kuruma büzülmesi çatlaklarını önlemede aynı derecede etkili değildir (Filho ve Sanjuan, 1999, Li, Lara ve Bolander, 2006). Çünkü betonun zamanla elastisite modülü yükselmiştir.

Yine de gevrek karakterdeki çimento bazlı kompozitlerin çatlak hassasiyetini azaltmada ve büzülmeden kaynaklanan çatlakların genişliğini sınırlamada kullanılabilir (Mesbahu ve Buyle-Bodin, 1999, Toutanji, 1999). Bazı durabilite problemlerinden kaynaklanan genleşme çatlaklarını önlemeye yönelik olarak, polipropilen liflerin kullanım etkinliği yapılan araştırmalarda rapor edilmiştir (Haddad ve Smadi, 2004, Park ve Lee, 2004).

Mikro beton gibi iri agrega ve ince agrega içermeyen kompozitlerde polipropilen lifin kullanım oranı %1-1,5'e çıkartılabilir. Örneğin çimento şerbetinde, %1 polipropilen lif kullanımının sülfat etkisi kaynaklı genleşme çatlaklarının oluşumunu önemli derecede engellediği rapor edilmiştir (Huang, 2001). Polipropilen liflerin bu tür kompozitlerde %1,5-2 ve üstü kullanımı halinde kuruma büzülmesini azaltmada

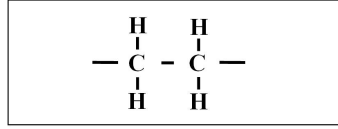
da etkili oldukları, ayrıca eğilme dayanımını arttırdıkları görülmüştür. Ancak yüksek lif dozajı işlenebilirlikte güçlük yaratmıştır (Manolis, Gareis, Tsonos ve Neal, 1997, Santos ve diğer., 2005).

Polipropilen lif katkılı çimento bazlı kompozitlerle yapılan darbe dayanıklılığı deneylerinde, %0,5 lif katkılı kompozitlerde, ilk çatlak için gerekli darbe sayısının, lifsiz örneğe göre önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir. Manolis ve diğerlerine (1997) göre hareketli yüklerin bulunduğu, darbe etkisindeki yapılarda, polipropilen lif kullanımı avantaj getirecektir.

Diğer taraftan polipropilen liflerin çimento bazlı kompozitlerde büzülmeyi engelleyici bir etkisinin olmadığı, büzülme çatlak oluşumunu engelleyemediğini belirleyen çalışmalar da mevcuttur. Bu gibi durumlarda, liflerin işlenebilirliğe olumsuz etkisinin performansı düşürdüğü belirtilmektedir (Aly, Sanjayan, ve Collins, 2008).

Polipropilen liflerin yüksek alkali ortamdaki performanslarının uzun vadede değişip değişmeyeceği Hannant (1998) tarafından 15 yıllık bir süre boyunca incelenmiş, performansta herhangi bir düşüş görülmemiştir.

Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) lifler: Polietilen $[(C_2H_4)_n]$, polimerizasyon derecesine göre yüksek yoğunluklu olarak üretilirse bu ismi almaktadır. Yoğunluğu 0,95-1,00 arasında olup, molekül ağırlığı 3-7 milyon arasındadır. Polipropilene benzer şekilde olefin grubu bir polimerdir ve yüzeyi hidrofob karakterdedir. Şekil 2.51’de polimer zinciri verilmiştir. Bazı özel tasarım polietilen lifler, Spectra®, Dyneema® gibi ticari isimler altında ultra yüksek yoğunluklu olarak da üretilmektedir. YYPE liflerin hem mekanik özellikleri hem de tokluk performansı çok üst düzeydedir. Söz konusu lifler, polimer lifler arasında en pahalı olanlarıdır. Çekme dayanımı 2500 MPa’ın üzerinde ve elastite modülü 80-120 GPa arasında değişmektedir. Kesmeye karşı da dayanıklı olan bu lifler, çimento bazlı kompozitlerden çok, polimer kompozitlerde veya savunma sanayisinde zırh ve çelik yelek üretiminde kullanılmaktadır.



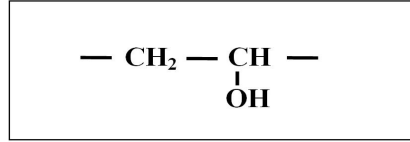
Şekil 2.51 Polietilenin zincir yapısı.

YYPE lifler, çimento bazlı kompozitlerde tokluk performansını arttırmada çok etkilidir. Matris özelliklerine bağlı olarak, YYPE lif kullanımının belli bir dozajın üzerinde (%1-1,5) çoklu çatlak oluşturma kapasitesi vardır (Kong, Bike ve Li, 2003, Zhang, Li, Nowak ve Wang, 2002, Kamal, Kunieda, Ueda ve Nakamura, 2008).

Ahmed, Maalej ve Paramasivam (2007), tarafından yapılan çalışmalarda, çelik lifle birlikte YYPE lifin hibrit kullanımı, kompozitte çoklu çatlak, yüksek çekme dayanımı ve yüksek tokluk gibi sonuçlar vermiştir. Darbe etkisi altındaki elemanların bütünlüğünü korumasında ve enerji sönümleyebilmesinde YYPE lif kullanımı oldukça etkilidir (Lee, Quek ve Maalej, 2006, Mihashi, Kikuchi, Akita ve Fantili, 2006). Deprem etkisinde olduğu gibi tekrarlı yüklemelerde de, YYPE lifli kompozitlerin lif içermeyenlere göre belirgin üstünlüğü rapor edilmiştir (Fischer ve Li, 2002).

Polivinil alkol (PVA) lifler: Polivinil alkol 1950’li yıllarda Japonya’da keşfedilmiş sentetik bir polimerdir. PVA liflerin yüzeyi hidrofil (su emici) bir yapıdadır (Şekil 2.52). PVA lifler mekanik açıdan oldukça güçlü liflerdir. PVA liflerin yoğunluğu $1,3 \text{ g/cm}^3$ ’tür. Çekme dayanımı 1000 MPa’ın üzerinde olup, elastisite modülü 25-45 GPa seviyelerindedir. Ayrıca yapısındaki (-OH) bağları nedeniyle çimento bazlı matrislerle kimyasal bağ oluşturma kapasitesi vardır. PVA liflerin matrisle olan aşırı yüksek aderansı, eğilme ve çekme gerilmeleri altında lifin kopmasına neden olmakta ve kompozitin tokluk performansı sınırlı kalabilmektedir. Bu nedenle lif matris aderansını makul seviyelere indirecek yöntemlerle PVA liflerin yüzey özellikleri değiştirilebilir veya lif yüzeyini kaydırıcı özellikte katkıları kullanılabilir (Li, Wu, Wang, Ogawa ve Saito, 2002, Kim, Kong ve Li, 2003). PVA liflerin çimento bazlı matrislerde kullanımı ile çatlak genişliği sınırlandırma (Westerholm, Lagerblad ve Forssberg, 2007), eğilme dayanımı ve tokluk artırma (Keoleian ve diğer., 2005, Zhang, Leung, ve Cheung, 2006, Ahmed, Mihashi ve

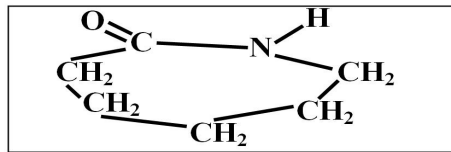
Suzuki, 2006), darbe dayanımını geliştirme (Yunsheng ve diğer., 2008), tekrarlı yükler altındaki performansı iyileştirme (Zhang ve Li, 2002) gibi hedeflere ulaşılabilmektedir. PVA lifler çatlak genişliğini sınırlamada oldukça etkili olduğu için durabilite açısından da avantaj sağlamaktadır (Li, Horikoshi, Ogawa, Torigoe ve Saito, 2004, Şahmaran ve Li, 2008).



Şekil 2.52 Polivinil alkolün zincir yapısı.

PVA liflerin yüksek mekanik özelliklerinin yanısıra, liflerin kullanıldığı matrisin özellikleri de önemlidir. Wongtanakitcharsen ve Naaman (2007), normal dayanımlı betonda erken yaşlarda serbest büzülmeyi engellemede hacimce %0,5 PVA lif kullanımının etkili olduğunu belirlemiştir. Diğer taraftan, Schwartzentruber, Philippe ve Marchese (2004) tarafından çok yüksek dayanımlı betonda (100-150 MPa) PVA liflerin %1 kullanımının çatlak hassasiyetini azaltma da etkisiz kaldığı rapor edilmiştir. Bu olayın nedeni rijitleşen matriste lif dozajının yetersiz kalması ile açıklanabilir.

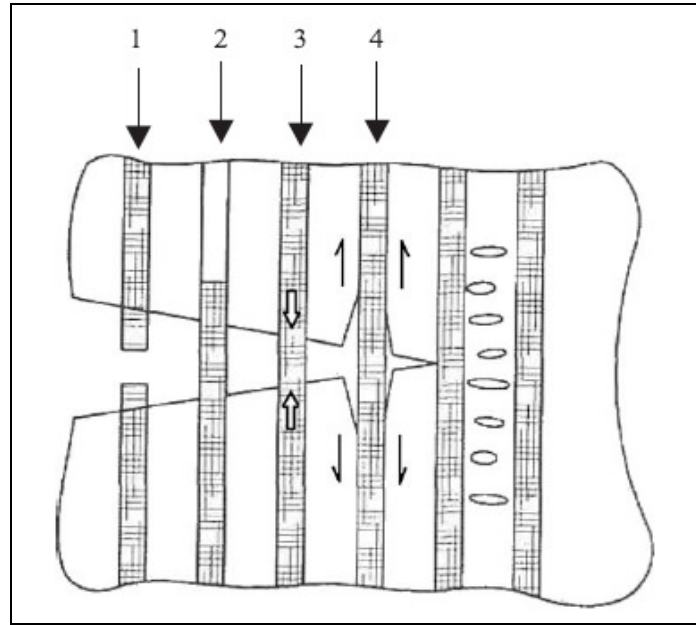
Naylon lifler: Sentetik lif üretiminde kullanılan ilk polimerlerden olan naylonun zincir yapısı Şekil 2.53’de verilmiştir. Yoğunluğu ortalama 1,15 g/cm³ olup, çekme dayanımı polipropilene kıyasla daha yüksektir (900 MPa). Elastisite modülü ise 5 GPa seviyelerindedir. Naylon lifler genel olarak hidrofil karakterde olup yaklaşık %4-5 oranında nemi absorbe edebilirler. Naylon liflerin çimento bazlı kompozitlerde plastik büzülme çatlaklarını azaltma ve durabilite problemlerinden kaynaklanan genleşmeyi engelleme için kullanıldığı rapor edilmiştir (Chen ve Liu, 2003, Song, Hwang ve Sheu, 2005).



Şekil 2.53 Naylon 6 polimerinin zincir yapısı.

2.4.3 Çimento Bazlı Lifli Kompozitlerin Tokluk Özellikleri

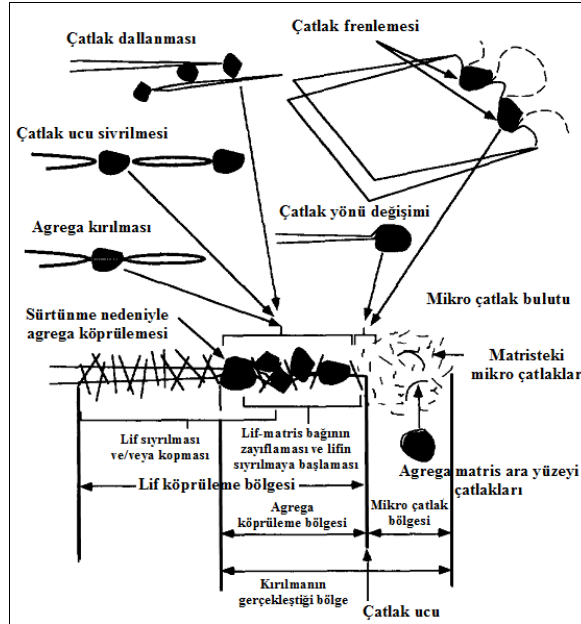
Yapılan araştırmalarda liflerin bünyesinde bulunduğu kompozitin tokluk performansına, çok farklı mekanizmalarla katkı sağladığı belirlenmiştir (Li ve Maalej, 1996, Singh, Shukla ve Brown, 2004). Singh ve diğerlerine (2004) göre bu mekanizmalar lif kopması, lif sıyrılması, lif köprülemesi ve lif-matris bağının zayıflaması olup, kompozitte çatlak ilerlemesi sırasında aynı anda gözlenebilirler (Şekil 2.54).



Şekil 2.54 Kompozitte çatlak ilerlemesi sırasında tokluk artırıcı mekanizmalar: 1. Lif kopması, 2. Lif sıyrılması, 3. Lif köprülemesi, 4. Lif-matris bağının zayıflaması.

Li ve Maalej (1996) ise, çatlak ilerlemesi sırasında lifli kompozitte tokluk artırıcı mekanizmaları daha ayrıntılı olarak Şekil 2.55'deki gibi modellemiştir. Burada tokluk artırıcı mekanizmaların etkili olduğu bölgeler de görülmekte olup, her mekanizmanın teorik olarak tokluk arttırma derecesi Tablo 2.5'de sunulmuştur. Tablo 2.5'de ayrıca çatlak ilerlemesini takip etmek için önerilen teknikler de verilmiştir. Bu tablodan elde edilebilecek en önemli sonuç, çoklu çatlak mekanizmasının tokluk performansını arttırmada diğer mekanizmalara kıyasla çok

daha etkili olmaktadır. Çoklu çatlak oluşumu, kompozitin tokluğunu çimento hamurunda oluşan tekil çatlakla kıyasla 1000 kata kadar arttırılabilmektedir.



Şekil 2.55 Kompozitte çatlak ilerlemesi sırasında tokluk artırıcı mekanizmaların bölgesel olarak gruplandırılması (Li ve Maalej, 1996).

Tablo 2.5 Farklı tokluk artırma mekanizmalarının tokluğu artırma dereceleri ve ölçüm teknikleri

Tokluk artırma mekanizması	Bölgesi	Çimento hamuruna kıyasla tokluk artışı	Kullanılan ölçüm tekniği	Not
Mikroçatlak bulutlanması	Çatlak önü	%20'ye kadar	X-ışını, stereomikroskop, lazer hologram, SEM, lazer interferometre	Dmaks=25 mm olan beton ile çimento hamuru kıyaslanmıştır.
Çatlak yönü değişimi	Çatlak ucu	%30' kadar	Yükleme sırasında SEM, X-ışını	-
Çatlak frenlemesi	Çatlak ucu	%60-90 (yüksek dayanımlı beton için)	Boyalı epoksi emdirmeye yöntemi ile ölçülmeli	Çimento hamurunda ölçülmemiş, teorik olarak yüksek dayanımlı beton için hesaplanmıştır.
Çatlak ucu sivrilmesi	Çatlak ucu	%15-40 (yüksek dayanımlı betona için)		
Agrega matris bağ köprülenmesi	Agrega köprüleme bölgesi	%130 (çimento harcı için)	Yükleme sırasında SEM, mikroskop, epoksi emdirmeye ve UV fotoğrafı, X-ışını	-
Lif-matris bağının zayıflaması ve lifin ayrışması	Çatlak ucu ve önü	250 kata kadar	Yükleme sırasında SEM	Lif uzunluğuna göre köprüleme bölgesi inceleme genişliği değişmektedir.
Çoklu mikro çatlak oluşumu	Çatlak önü	1000 kata kadar	Yükleme sırasında fotoğraf çekimi	Örnek yüzeyinde 1000 cm ² 'lik bölge incelenmiştir.

* Farklı araştırmacılar tarafından farklı ölçüm teknikleri kullanılarak elde edilmiş değerlerdir. Ayrıntı için Li ve Maalej, (1996).

2.4.4 Çimento Bazlı Kompozitlerde Çoklu Çatlak Davranışı

2.4.4.1 Giriş

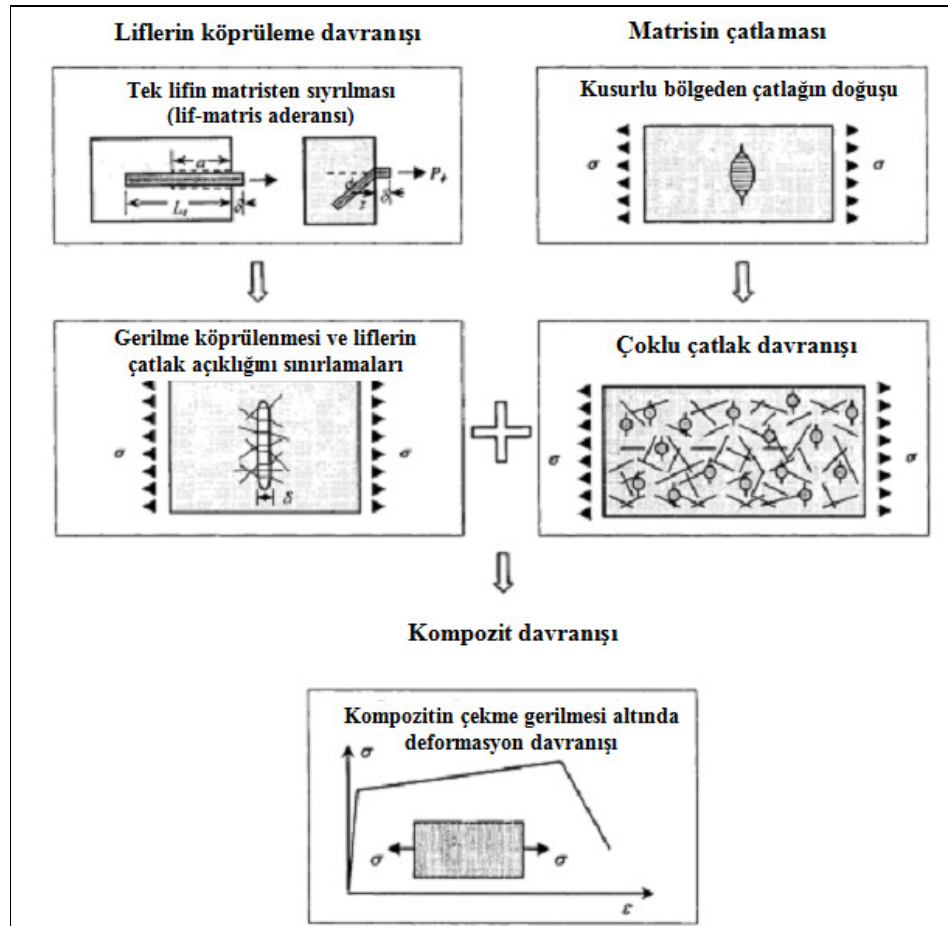
Çimento bazlı kompozitlerde tokluğu yükseltmeye yönelik olarak, çoklu çatlak davranışını oluşturma hedefi son yılların güncel araştırma konusudur. Çimento bazlı kompozitlerde çok yüksek lif dozajlarına çıkılmadan, tokluk davranışını çoklu çatlak oluşturarak elde etmeye yönelik olarak yapılan çalışmalar “çoklu çatlak mekanizması”nı gündeme getirmiştir. Yapılan mikro-mekanik hesaplamalar çoklu çatlak davranışını düşük lif dozajlarında (%1-2) oluşturmak için, lif çapının 50 mikronun altında olması gerektiğini göstermiştir. Polimer kökenli lifler genellikle çekilerek bu çaplarda üretildiği için, geometrik olarak çelik liflere kıyasla bu amaca daha uygundur. Çelik lifler 150-500 mikron çaplarında üretilmekte, daha küçük çaplı üretimin maliyeti oldukça yükselmektedir (Li, 2002). Ancak genelleme yapılmaması gerektiği, farklı geometrik formlarda özel çelik liflerle de (Torex®) çoklu çatlak elde edilebileceği; Kim, Naaman ve El-Tawil (2008) tarafından gösterilmiştir.

Polimer kökenli liflerden, örneğin, YYPE lifler %2 oranında kullanılarak kompozitin çekme birim deformasyon kapasitesi %5'e kadar çıkartılmış, çoklu çatlak davranışı gözlenebilmiştir (Kanda ve Li, 1998). Çekme gerilmesi altındaki örnekte, çekme birim deformasyonu artarken, ilk çatlak dayanımından daha yüksek yük seviyelerine ulaşılabilirdiği gözlenmiştir. Bu kompozitlerde non-lineer elastik davranışın gözlemlendiği bölge, ilk çatlak dayanımını aşmaktadır. Bir çeşit deformasyon sertleşmesi davranışı, çekme gerilmelerine dik yönde paralel çatlakların oluşumu ile yüksek deformasyon seviyelerine kadar devam etmektedir. Bu davranışı lifin kökeni, mekanik performansı, miktarı, matris tokluğu, matrisin boşluk yapısı, lif yönlenmesi, lif-matris arayüzey özellikleri gibi pek çok parametre etkilemektedir. Çatlak açıklığı, liflerin köprüleme yaparak, matrise ilk çatlak gerilmesinden daha yüksek gerilme değerlerini yüklemesini sağlayacak seviyelerde kalmalı, daha fazla açılmamalıdır. Bunun sağlanması için de lif-matris arası aderansın belli bir değerden yüksek olması gerekir. Aksi takdirde matriste yeni çatlaklar açılmadan tek çatlak genişleyerek yük seviyesi düşmeye başlayacaktır (Kanda ve Li, 1998).

Yukarıda özetlenen çalışmalardan elde edilen bilgi birikimi ile çoklu çatlak ve deformasyon sertleşmesi davranışı modellenmiştir (Li, 2002). Bu davranışı etkileyen faktörleri tanımlamaya yönelik olarak aşağıdaki mekanizma önerilmektedir.

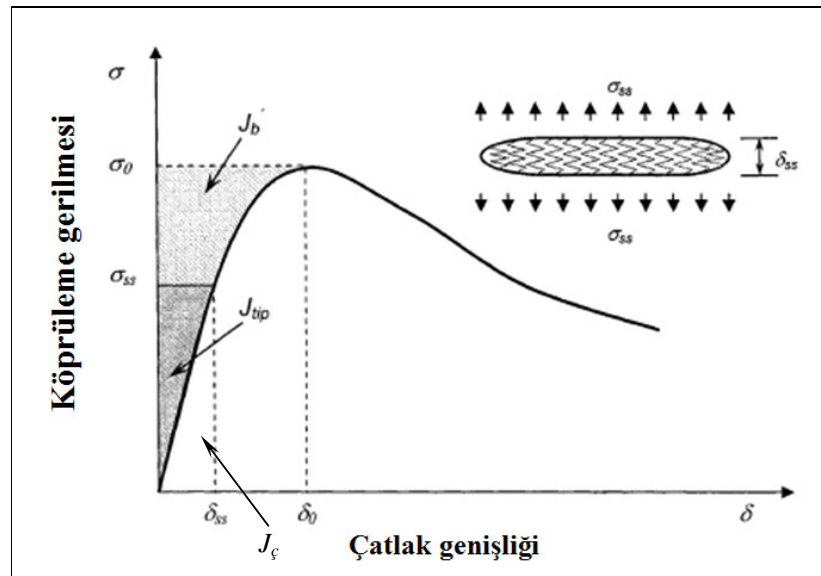
2.4.4.2 Çoklu Çatlak ve Deformasyon Sertleşmesi Davranışının Modellenmesi

Lif katkılı kompozitlerde çoklu çatlak oluşturmada en önemli kriter, matriste oluşan çatlaklar arasındaki “liflerin yükü köprüleme özelliği”dir (Li, 2002). Şekil 2.56’da liflerin çatlak köprüleme performansının kompozitin çoklu çatlak potansiyeli oluşturmaları ile olan ilişkisi şematik olarak verilmiştir (Horikoshi, Ogawa, Saito, Hoshiro, 2005).



Şekil 2.56 Çoklu çatlak oluşturma mekanizması (Horikoshi ve diğer., 2005).

Lif köprüleme özelliği, köprüleme gerilmesi – çatlak genişliği ($\sigma - \delta$) eğrisi ile ifade edilmektedir (Şekil 2.57). Bu eğri doğrudan çekme gerilmesi altındaki lifli bir örnekte, çatlak genişliğine bağlı olarak köprüleme gerilmesi ölçülerek elde edilmektedir. Çatlak açıklığı ölçümü için Li ve Maalej (1996), optik mikroskoba bağlı bir kamera kullanmıştır. Çatlak açıldıkça (çatlak yüzeyleri arasındaki mesafe arttıkça) lifler gerilmekte ve aynı zamanda köprüleme gerilmesi artmaktadır. Çatlak belli bir açıklığa ulaştığında hem gerilme hem de çatlak açıklığı sabitlenerek liflerin enerjiyi matrise aktarması ve matriste yeni çatlakların açılması mekanizmanın özünü oluşturmaktadır.



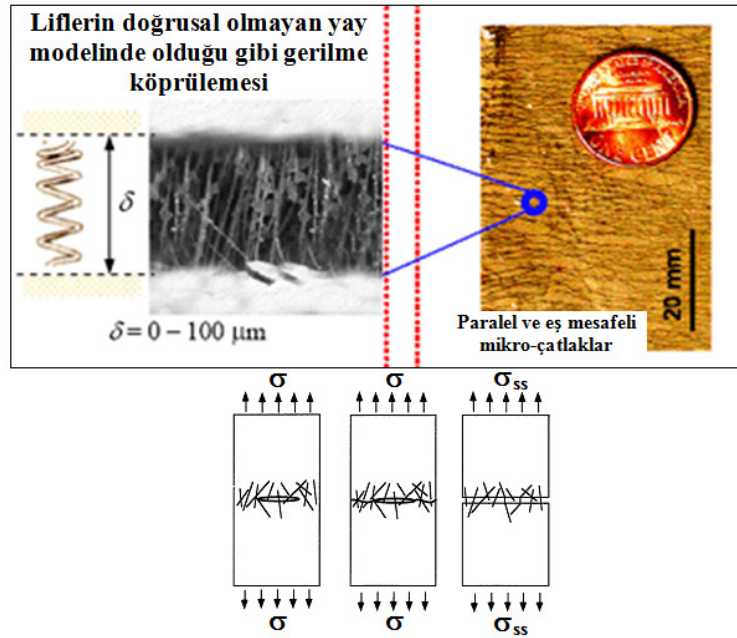
Şekil 2.57 Çekme gerilmesi altında köprüleme gerilmesi (σ) - çatlak genişliği (δ) ilişkisi (kısaltmalar ilerleyen paragraflarda açıklanacaktır) (Li, 2003b).

Deformasyon sertleşmesi ve çoklu çatlak davranışına karşılık deformasyon yumuşaması ve tekil çatlak mekanizmasının anlaşılması için lif köprülemesinin rolünün açıklanması gerekir. Çoklu çatlak için gerekli iki kriter olan *ilk çatlak dayanımı kriteri* ve *çatlak kararlılığı (enerji dengesi) kriteri*, lif köprülemesi mekanizması ile açıklanır. Bu kriterlerden herhangi biri sağlanmazsa kompozit çekme gerilmesi altında tek bir çatlak oluşumu ile geçmektedir (Li, 2003b).

a) İlk çatlak dayanımı (σ_{fc}) kriteri

Şekil 2.57’de verilen $\sigma - \delta$ eğrisinin maksimum köprüleme gerilmesine kadar olan kısımdaki davranış, çatlak yüzeylerine bağlanmış doğrusal olmayan elastik davranışlı çok sayıda yay ile modellenenebilir (Şekil 2.58). Çoklu çatlak davranışının ilk kriteri, matrisin ilk çatlak dayanımının (σ_{fc}), en büyük lif köprüleme gerilmesinden (σ_0) daha düşük olmasıdır:

$$\sigma_{fc} < \sigma_0 \quad (2.27)$$



Şekil 2.58 Çatlak köprüleyen liflerin doğrusal olmayan elastik davranışlı yay ile modellenmesi (Mishra ,1995).

İlk çatlak dayanımı matristeki kusur oranına (boşluk yapısı) ve matrisin kırılma tokluğuna (K_m) bağlıdır. İlk çatlak dayanımı, matriste açılan çatlağı tutan liflerin köprüleme direncini aşarsa, ikinci bir çatlak oluşma ihtimali ortadan kalkmaktadır. Çatlağın açıldığı kesitteki lifler, köprüleme görevini gerçekleştirecek miktarda veya dayanımda değilse, ya da çatlak açıldığında, matristen zayıf aderansları nedeniyle aniden sıyrılıyorsa bu kriter sağlanmaz. Yük seviyesinde düşüş meydana gelerek, ilk çatlağın genişliği artmaya devam eder. Klasik çelik lifli kompozitlerde veya

düşük dayanımlı polimer kökenli lif katkılı kompozitlerde gözlenen davranış budur. Diğer bir olasılık da, lif-matris aderansının çok yüksek olması halinde, lifin kopması ve kesitteki köprüleyici lif sayısının azalmasıdır. Bu durumda hızlı bir yük düşüşü meydana gelir.

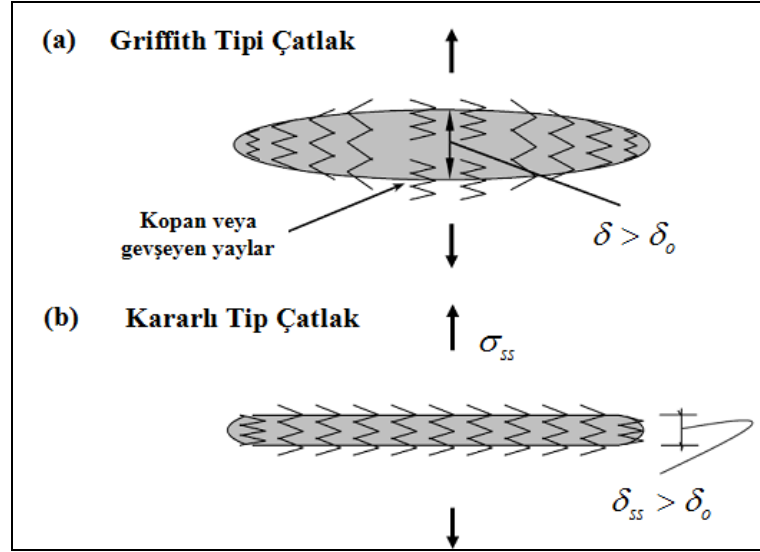
b) Çatlak kararlılığı kriteri

Çoklu çatlak davranışı için ikinci kriter ise, çatlak kararlılığının sağlanmasıdır. Bu kriter, çatlağın genişlemesi ile gerilen liflerin (modelde yayların) belli bir çatlak genişliğinde matrisi tutması ve aktarabildiği kadar çok enerjiyi matrise aktarması varsayımına dayanır. Belirli bir kararlı köprüleme gerilmesinde (σ_{ss}), kararlı çatlak genişliği (δ_{ss}) elde edilmektedir (Şekil 2.57). Hedeflenen kriteri sağlayacak olan, liflerin ve matrisin özellikleridir. Bu özelliklerin, davranış üzerinde nasıl etkili oldukları ilerleyen aşamalarda incelenecektir.

Çatlak kararlılığı analizlerinde gözlenen iki farklı durum Şekil 2.59'da şematize edilmiştir. Çoklu çatlak davranışı açısından ikinci durum hedeflenmelidir. İlk çatlağın oluşması ve açılması sırasında lifler yeterli dayanımda değilse veya sıyrılıyorsa çatlak açılmaya devam edeceği için, enerjinin büyük bir kısmı çatlak açılması ile harcanır. Lif tarafından matrise aktarılan enerji düşük seviyede kalır ve tipik Griffith çatlağına benzer bir şekilde çatlak genişler (deformasyon yumuşaması) (Şekil 2.59-a). Yeni bir çatlak oluşma ihtimali ortadan kalkmakta, yük seviyesi düşerek tek çatlak açılmaya devam etmektedir. Eğer aktarılan enerji yüksek seviyelerde ise, çatlak ucu ilerleyerek tüm kesitte sabit, diğer bir deyişle kararlı bir çatlak genişliği yaratacaktır (Şekil 2.59-b). Kararlı çatlak genişliğinde lifler gerilmeyi matrisin daha iç bölgelerine aktarmakta ve bu bölgelerdeki boşluk yapısına göre yeni çatlaklar oluşmaktadır. Oluşan çatlakların da kararlı oldukları genişliğe ulaşmasıyla birlikte, gerilme daha da iç bölgelere iletilmesi sağlanarak, yeni çatlaklar oluşturulmakta ve çoklu çatlak davranışı meydana gelmektedir.

Kopma uzaması düşük ve matrisle aderansı çok yüksek olan lifler için de Şekil 2.59-a'da görülen durum gerçekleşir. Çünkü lifin düşük çatlak açıklıklarında

kopması nedeniyle, devre dışı kalarak, enerjiyi matrise aktarma ihtimali ortadan kalkar.



Şekil 2.59 Lifli kompozitlerde Griffith tipi çatlak ve kararlı çatlak oluşumu (Li, 2003b).

Şekil 2.57'deki $\sigma - \delta$ eğrisinden görüldüğü gibi çatlak kararlılığının sağlanması için çatlak oluşuktan sonra lif ile matris arasında enerji dengesinin kurulması gereklidir.

Çatlağın açılarak sönmlediği enerji (J_c), liflerin gerilerek δ_{ss} açıklığına ulaşmaya kadarki bölgede, $\sigma - \delta$ eğrisinin altında kalan alandan (Şekil 2.57) belirlenebilir:

$$J_c = \int_0^{\delta_{ss}} \sigma(\delta) d\delta \quad (2.28)$$

Li (2000)'ye göre $\sigma - \delta$ eğrisindeki δ_{ss} açıklığına kadar *liflerin köprüleme yoluyla matrise aktaracağı enerji miktarı* aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$J_{tip} = \sigma_{ss} \cdot \delta_{ss} - \int_0^{\delta_{ss}} \sigma(\delta) d\delta \quad (2.29)$$

Buradaki J_{tip} değeri çatlak ucu tokluğudur ve düşük lif dozajları (%2-3'ün altı) için matrisin tokluğuna (J_m) yakın bir değer almaktadır. Bu durumda matris tokluğu;

$$J_{tip} \cong J_m = \frac{K_m^2}{E_m} \quad (2.30)$$

şeklinde ifade edilebilir. K_m matrisin kırılma tokluğu ve E_m matris elastisite modülü olup S/Ç oranı, ince agrega/çimento oranı gibi karışım oranlarından etkilenen parametrelerdir.

Şekil 2.57'deki $\sigma - \delta$ eğrisinde liflerin köprüleme yoluyla matrise aktaracağı enerji miktarının en fazla J_b' kadar olacağı görülmektedir. Bu durumda deformasyon sertleşmesinin gözlenmesi için, maksimum köprüleme gerilmesinde çatlak ucu tokluğunun üst sınırı (J_{tip}) şu şekilde olacaktır:

$$J_{tip} = \frac{K_m^2}{E_m} \leq \sigma_o \cdot \delta_o - \int_0^{\delta_o} \sigma(\delta) d\delta \equiv J_b' \quad (2.31)$$

(2.31) formülünün sol tarafındaki parametreler matris özelliklerinden (K_m , E_m), sağ tarafındaki alan da lif ve ara yüzey özelliklerini etkilediği için, çoklu çatlak oluşturma için aynı anda kompozitin tüm bileşenleri dikkate alınmalıdır. Genel olarak çoklu çatlak kriteri,

$$J_{tip} \leq J_b' \quad \text{veya} \quad 1 \leq \frac{J_b'}{J_{tip}} \quad (2.32)$$

şeklinde yazılabilir. Kararlı çatlak genişliğine ulaşıldıktan sonra, çatlağı köprüleyen liflerin matrise aktardığı enerji ne kadar fazla ise, çoklu çatlak oluşma olasılığı o

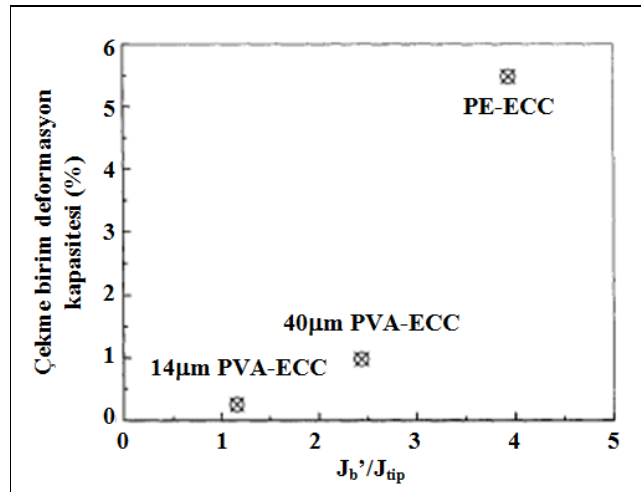
kadar fazla olacaktır (Horikoshi, Ogawa, Saito ve Hashiro, 2005). Bunu sağlamamanın iki yolu vardır. İlki J_{tip} 'i yani J_m 'yi azaltmaktır. J_m ; matris tokluğuna (K_m) ve elastisite modülüne bağlıdır. Matris tokluğunu düşürmek ve matris elastisite modülünü yükseltmek J_m 'yi azaltacaktır (Li, Mishra ve Wu, 1995). İkincisi ise J_b 'değerini arttırmaktır. J_b 'değerini lif matris arayüzey özellikleri etkilemektedir.

Lif ile matris arasında sadece sürtünme kuvvetlerini oluşturan, fiziksel temas olması durumunda $\sigma - \delta$ eğrisinin eğimi lif dozajı (V_f), çapı (d_f), uzunluğu (L_f), rijitliği (E_f) ve arayüzey sürtünme katsayısı (β_o) ile ilişkilidir. Yalnızca sürtünme kuvvetlerini oluşturan fiziksel temas olması halinde (PP, YYPE gibi olefin liflerde), lif dozajını arttırmak, çapını küçültmek ve uzunluğunu arttırmak lifler tarafından matrise aktarılan enerjiyi (J_b ') arttırmaktadır. Aynı zamanda bu tür hidrofob liflerin yüzey özellikleri, fiziksel veya kimyasal yöntemlerle değiştirilerek matris aderansları arttırılacak olursa (τ_o) çoklu çatlak oluşturma kapasiteleri arttırılabilir.

Lif yüzey yapısına bağlı olarak, bazı liflerde fiziksel aderansın yanında kimyasal reaksiyonla matris ile lif arasında bağ oluşabilmektedir. Bu aderansa “kimyasal aderans” adı verilir (G_d) ve bu aderans değerı aşılmadan çatlak açılmaz. Örneğin PVA yüzeyindeki -OH bağları nedeniyle çimento hidratasyon ürünleri ile reaksiyona girerek kimyasal bağ oluşturabilir. Sözü edilen bağın aşılması için gerekli gerilme $\sigma - \delta$ eğrisinin belli bir gerilmeden başlamasına yol açar. Bu durum liflerin aktaracağı enerjiyi azaltır ve J_b 'değerı düşer. Diğer yandan kimyasal bağ oluşumu, liflerin kopmasına yol açabildiği için de J_b 'değerı azalır. Bu açıdan kimyasal bağın düşük olması (G_d) tercih edilir. PVA lifler için kimyasal bağı azaltıcı yağlama gibi çeşitli yüzey işlemleri kullanılmaktadır (Li, Wu, Wang, Ogawa ve Saito, 2002, Lin, Kanda ve Li, 1999).

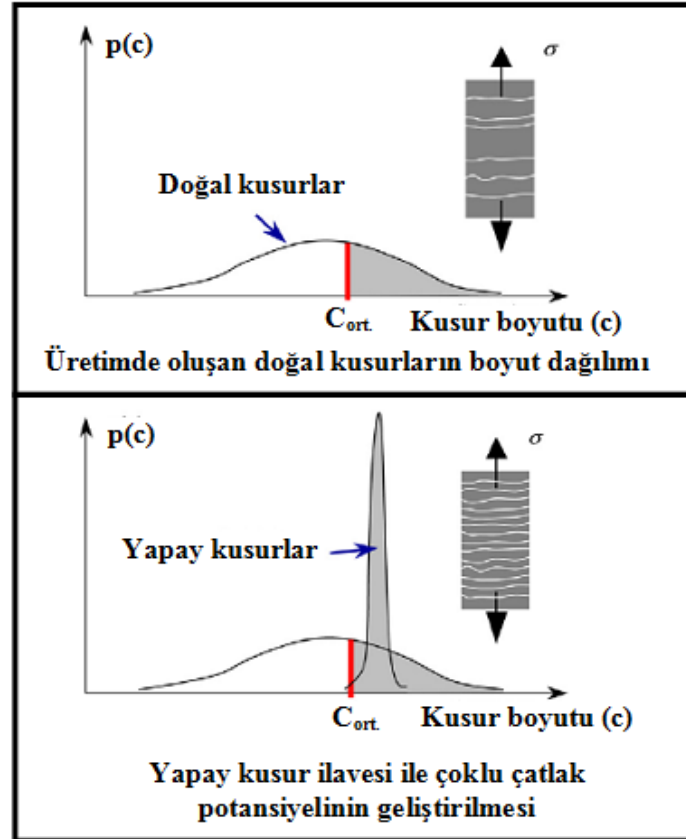
Yukarıdaki paragraflarda sözü edildiği gibi liflerin yüzey özelliklerine göre, çoklu çatlak oluşturma amacıyla izlenecek yöntemler birbirine taban tabana zıt olabilmektedir.

Kanda ve Li (1999), yaptıkları deneysel çalışmada aynı matrisi kullanarak üç farklı lifli kompozit hazırlamıştır. Bu kompozitlerde 14 mikron ve 40 mikron çaplı PVA lif ile PE lif kullanarak çekme birim deformasyon kapasiteleri ölçülmüştür. Şekil 2.60'da kompozitlerin çekme birim deformasyon kapasiteleri ile J'_b / J_{tip} oranları arasındaki ilişki görülmektedir. Tüm örneklerde çoklu çatlak davranışı gözlenmesine rağmen, PVA lifli kompozitlerde çekme birim deformasyon kapasitesi PE liflilere göre daha düşüktür. Bu farklılık J'_b / J_{tip} oranı ile de yakından ilişkilidir. Formül 2.32'den J'_b / J_{tip} oranının 1'den büyük olmasının çoklu çatlak için yeterli olduğu görülmektedir. Ancak PE lifli kompozitte çekme birim deformasyon kapasitesinin de artması, J'_b / J_{tip} oranının 3'ten büyük olması ile sağlanmıştır. PVA liflerin matrisle olan yüksek bağı nedeniyle bu liflerin kopması, J'_b / J_{tip} oranının düşük kalmasına neden olmaktadır. Ancak lifsiz matrise kıyasla önemli artış elde edildiği de vurgulanmalıdır. Bu açıdan PVA liflerin performansı küçümsenmemelidir. Kanda ve Li (1999), yaptıkları deneyler sonucunda her çoklu çatlak davranışı gösteren kompozitin çekme deformasyon kapasitesinin yüksek olamayacağını ve çekme deformasyon kapasitesinin J'_b / J_{tip} oranına bağlı olduğunu göstermiştir.



Şekil 2.60 PVA ve YYPE lif içeren kompozitlerin J'_b / J_{tip} oranları ile çekme birim deformasyon kapasiteleri arasındaki ilişki.

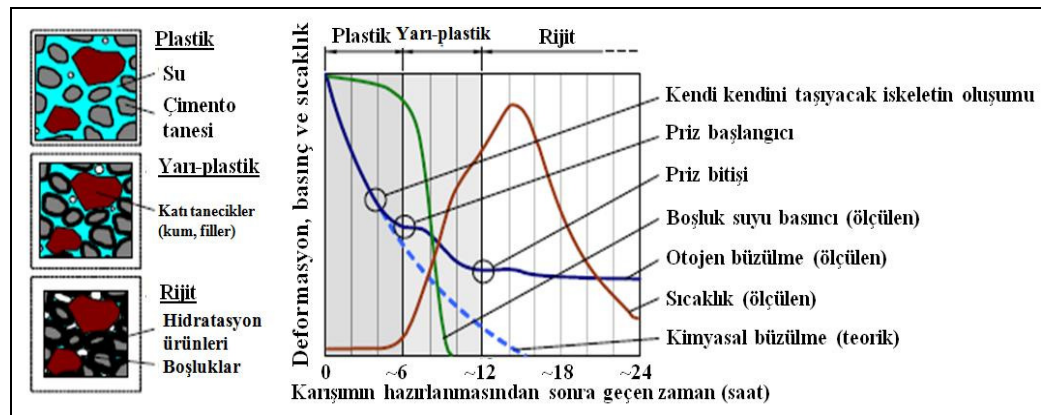
Matris tokluğunun yanında matrisin çoklu çatlak kararlılığını etkileyen bir başka parametre de matristeki kusur dağılımıdır. Lifin köprüleme ile yaydığı enerjinin, matriste yeni çatlaklar oluşturması için kusurlu bölgeye ihtiyaç vardır. Kusurun heterojen boyutta dağılımı yeni oluşan çatlakta lif köprülemesi ihtimalini zayıflatarak, çoklu çatlak davranışının zayıflamasına neden olabilmektedir. Bu açıdan kusurun matriste homojen boyutta dağılmasını sağlamak kararlı çatlak genişliğinin çok sayıda çatlakta oluşmasını sağlayacaktır (Şekil 2.61). Kusurun matriste homojen boyutta dağılmasını sağlamak için matrise hafif agrega veya sentetik polimer tanecik ilavesinin, çoklu çatlak davranışını olumlu yönde etkilediği belirtilmiştir (Li ve Wang, 2006, Wang ve Li, 2004).



Şekil 2.61 Matriste kusur boyutunu ve dağılımını homojenleştirme yoluyla çoklu çatlak davranışını geliştirme (Li ve Wang, 2006).

2.5 Çimento Bazlı Kompozitlerde Büzülme

Çimento bazlı kompozitlerde, su ile çimentonun bir araya gelmesinden hemen sonra, birtakım fiziksel (serbest suyun bünyede hareketi) ve fizikokimyasal (hidratasyon reaksiyonları) değişiklikler başlar. Sözü edilen olaylar nedeniyle kompozit zaman içinde plastik, yarı-plastik ve rijit olarak adlandırılacak üç farklı fazda bulunur. Fazlar arası geçiş süresi karışım bileşenlerine bağlı olup, plastik kıvamdan yarı plastik kıvama geçiş kabaca priz başlangıcı ile ilişkilendirilebilir. Yarı plastik kıvamdan rijit hale geçiş ise priz sonu ile ilişkilendirilebilir. Bu ayrımlar çok net olmayıp pek çok malzeme parametresinden ve dış koşullardan etkilenmektedir. Şekil 2.62’de S/Ç oranı 0,45 olan kendiliğinden yerleşen beton karışımı için faz geçiş süreleri verilmiştir (Esping, 2008). Bu faz geçişleri arasında, yapısında önemli değişiklikler meydana gelen kompozitin, hacminde de değişiklikler meydana gelmektedir. Çimento bazlı kompozitlerde, hidratasyon reaksiyonlarının yapısı gereği ve su kaybı nedeniyle hacim değişimi büzülme karakterlidir.

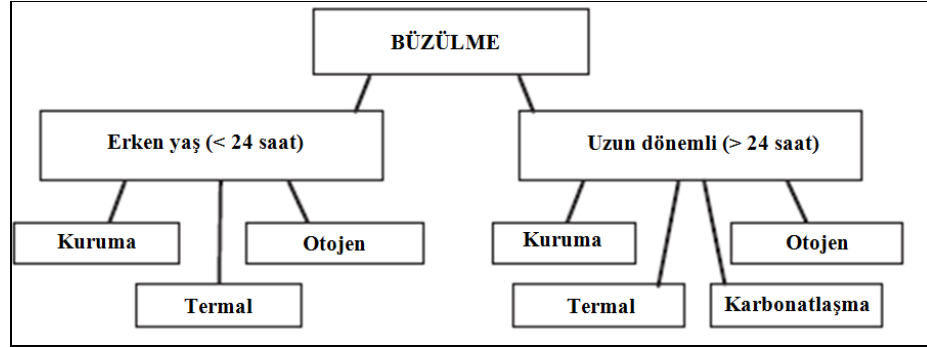


Şekil 2.62 S/Ç oranı 0,45 olan kendiliğinden yerleşen beton için faz değişimi geçiş süreleri ve otojen büzülme (Esping, 2008).

Büzülmenin oluşum mekanizmaları beş ana grupta toplanabilir:

- Plastik Büzülme
- Bünyesel (Otojen) Büzülme
- Kuruma Büzülmesi (Hidrolik Büzülme)
- Termik Büzülme
- Karbonatlaşma Büzülmesi

Teorik olarak böyle bir gruplandırma yapılsa da, çimento bazlı kompozitlerin büzülmesi sırasında zamana bağlı olarak birkaç mekanizma birlikte etkili olabilmektedir. Holt (2005), büzülmeyi ilk 24 saatte ve sonrasında Şekil 2.63'teki gibi gruplandırmıştır.



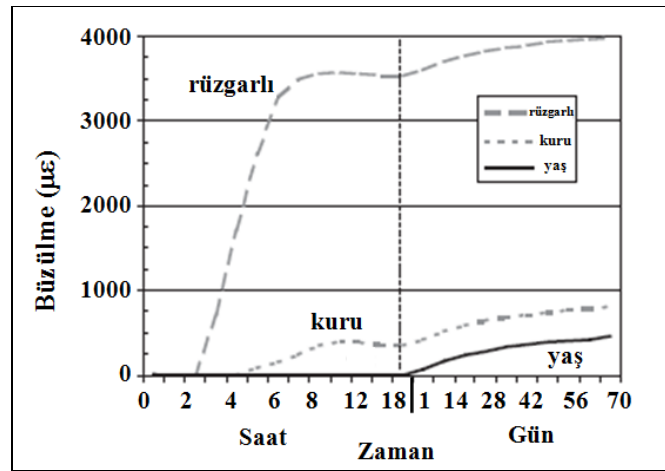
Şekil 2.63 İlk 24 saatte ve sonrasında etkili olan büzülme mekanizmalarının gruplandırılması (Holt, 2005).

2.5.1 Büzülme Mekanizmaları

2.5.1.1 Plastik Büzülme

Plastik büzülme, çimento bazlı kompozitlerde, erken yaşta ortaya çıkan fiziksel kökenli bir büzülme mekanizmasıdır. Yapı elemanının bulunduğu ortamın nem ve sıcaklık koşulları, rüzgâr etkisi gibi parametreler, yüzeyden kaybedilen su miktarını arttırsa plastik büzülme riski artar. Plastik büzülmenin meydana gelmesi için buharlaşan su miktarının, terleme yoluyla yüzeye çıkan su miktarını aşması gerekir. Betonun dış yüzeyindeki kuruma, yüzeyde çekme gerilmeleri yaratarak yüzeysel çatlaklara neden olur. Kompozit açısından terleme hızını etkileyen temel faktör taze betonun kompasesidir. Düşük S/Ç oranlı ve kaliteli betonların kompasesi yüksek olduğundan, bünye suyunun yüzeye çıkma olasılığı azalır. Bu nedenle, uygun kür koşulları sağlanmadığı takdirde, kalitesi yüksek betonlarda plastik büzülme olayına S/Ç oranı yüksek olan betonlara kıyasla daha sık rastlanır. Plastik büzülme, tanımı gereği dış ortam koşullarının zorlaması ile meydana gelen bir büzülme tipidir. Ancak ilk 24 saatteki hidratasyon reaksiyonlarının yarattığı hacimsel değişiklikler de ister istemez plastik büzülme değerine ilave olmaktadır.

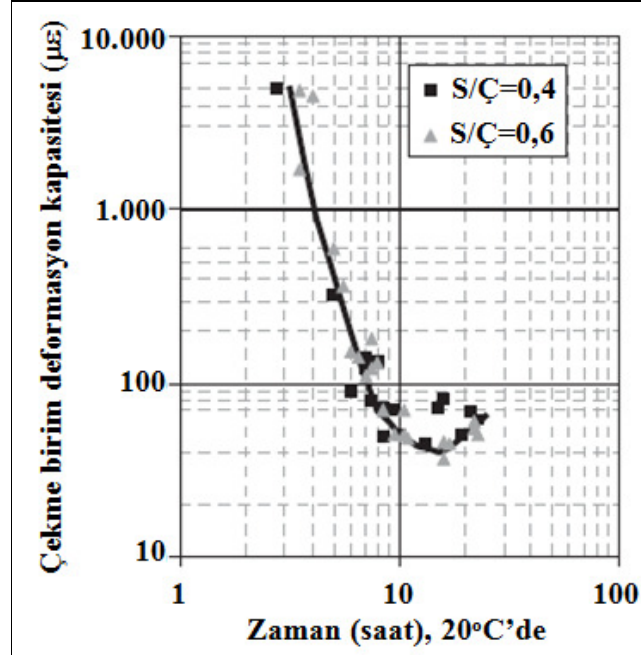
Erken yaşlarda yüksek sıcaklık, düşük nem, güneş ışığı veya rüzgar gibi olumsuz etkilere maruz kalan bir beton için ilk saatlerdeki büzülme çok yüksek mertebelere ulaşabilir. Şekil 2.64'te erken yaşlarda %40 bağıl nem etkisinde kurutulan, 2 m/s'lik rüzgar etkisinde kalan ve ıslak kürle korunan üç farklı örneğin serbest büzülme değerleri görülmektedir (Holt, 2005). Büzülme gelişimi hem erken yaşlarda hem de uzun vadede sunulmuştur. Plastik büzülmenin etkisi ile rüzgar etkisi altındaki beton ilk 18 saatte $3500 \cdot 10^{-6}$ büzülürken, kür edilen betonda büzülme gözlenmemektedir. İlk günden sonra tüm örnekler havada bekletilmiştir. Bu sürede yapılan ölçümlerde tüm örneklerin eşit miktarda büzüldüğü görülmüştür. Elde edilen sonuçlar erken yaşlarda kürün önemini göstermektedir.



Şekil 2.64 Farklı kür koşullarında erken yaşlarda ve uzun vadede büzülme, rüzgar: 2 m/s, kuruma: bağıl nem %40, yaş kür: bağıl nem %100 (Holt, 2005).

Büzülmenin taze betona en büyük zararı kısıtlı durumda çatlamaya yol açmasıdır. Büzülen betonun kısıtlı durumda erken yaşlarda çatlak hassasiyetini inceleyen araştırmacılar, betonun çekme birim deformasyon kapasitesinin zamana bağlı değişimini Şekil 2.65'deki gibi belirlemiştir (Holt ve Leivo, 2004). Bu grafikten S/Ç oranı 0,4-0,6 arasında olan betonların, çatlamaya en hassas olduğu zamanın dökümden sonraki 10-20 saat arası olduğu görülmektedir. Daha öncesinde beton henüz plastik kıvamda olduğu için, daha sonrasında da yeterli rijitliğe ulaştığı için çekme birim deformasyon kapasitesi yükselmektedir. Çimento bazlı kompozitlerin

çekme etkilerine karşı en zayıf oldukları bu esnada onları korumak, gerekli tedbirleri almak gerekir.



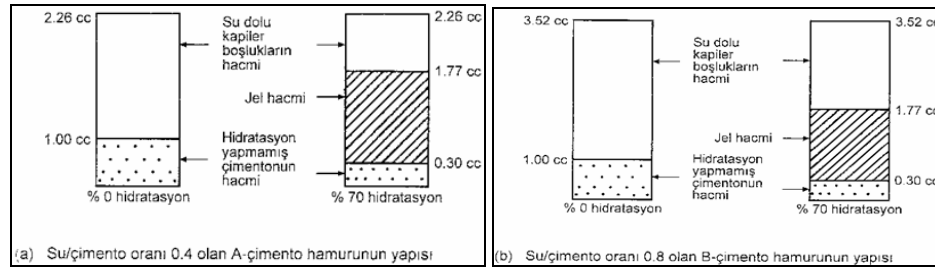
Şekil 2.65 Taze betonun çekme birim deformasyon kapasitesinin zamana bağlı değişimi, (Holt ve Leivo, 2004).

2.5.1.2 Otojen (Bünyesel) Büzülme

Bünyesel büzülme çimento bazlı kompozitler için kaçınılmaz bir olaydır. ACI 116R'de bünyesel büzülme “dış ortamla nem alışverişi olmaksızın ve ortam sıcaklığının değişmediği durumda, çimento-su reaksiyonu ile oluşan ürünlerin yarattığı hacim değişimi” olarak tanımlanmaktadır. Bazı araştırmacılar bünyesel büzülmeyi, kimyasal büzülme olarak da adlandırmaktadır. Çünkü bünyesel büzülmenin kaynağı büyük oranda çimento hidratasyon reaksiyonlarıdır (Holt, 2005). Hidratasyon sonucu toplam mutlak hacimde bir büzülme olur. "c" m³ hacmindeki çimentoya, hidratasyon için gerekli "e" m³ su katılıp karıştırıldığında, reaksiyon sonucu elde edilen hidrate ürünün hacmi "h" m³ olacaktır.

$$h < (c + e) \quad (2.33)$$

burada; c, e ve h mutlak hacimlerdir. Ancak oluşan hidrate jelin görünen hacmi (katıların hacmi) ise Formül 2.33'ün aksine genişler. Diğer bir deyişle, oluşan jel çok boşluklu olup, görünen hacmi büyüktür (Baradan, 2000). Şekil 2.66'da su/çimento oranı 0,4 ve 0,8 olan iki farklı çimento hamuru için %70 hidrasyon oranında meydana gelecek teorik reaksiyon ürünleri görülmektedir.



Şekil 2.66 Çimento hamurlarının hidrasyon öncesindeki ve sonrasındaki yapıları.

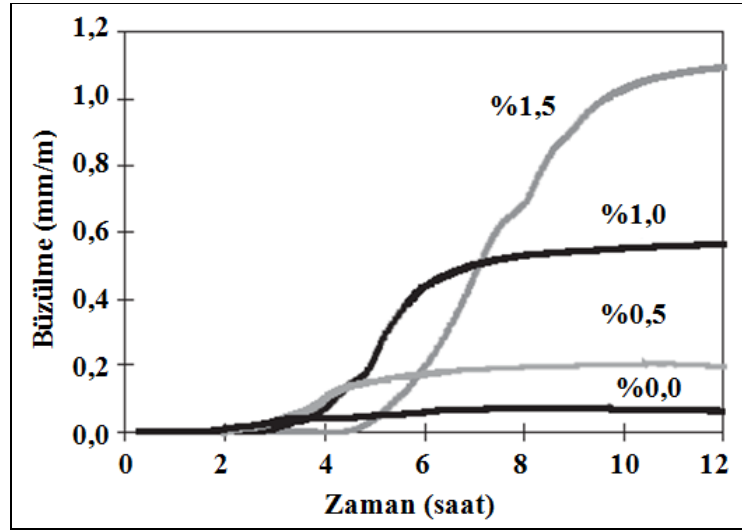
Çimento dozajı yüksek veya çimento hamuru oranı fazla olan karışımlar daha çok bünyesel büzülme yapar. Çimentonun karma oksitlerinin tümünün su ile reaksiyonu sonucu oluşan ürünlerin hacmi, başlangıçta reaksiyona girenlerden farklı mertebelerde daha küçüktür. Fazların ağırlıkça oranları kullanılarak bünyesel büzülme miktarı ampirik bağıntılarla tahmin edilebilir (Holt, 2005):

$$V_{\text{kimyasal büzülme}} (\%) = 0,0532[C_3S] + 0,0400 [C_2S] + 0,1113 [C_4AF] + 0,1785 [C_3A] \quad (2.34)$$

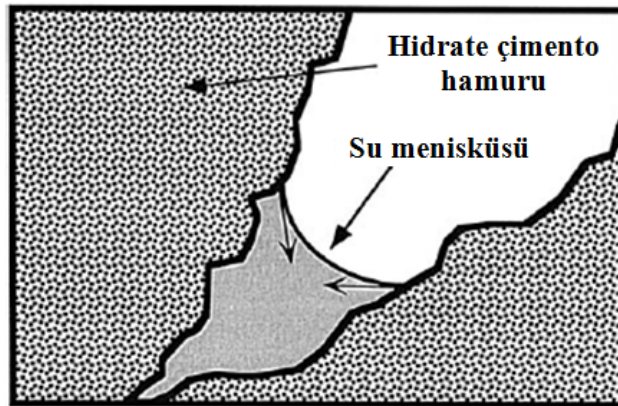
Bünyesel büzülme, hidrasyon reaksiyonunun hızı ile ilişkili olduğu için, çimento inceliğinin artması veya çimentonun matriste dağılımının homojenleşmesi bünyesel büzülmeyi artırır (Bentz ve Jensen, 2004, Holt, 2005). Bu açıdan *akışkanlaştırıcı katkıların dolaylı olarak bünyesel büzülmeyi arttırabilecekleri* öngörülebilir (Holt ve Leivo, 2004). Şekil 2.67'de verilen deney sonuçları akışkanlaştırıcı katkıların bünyesel büzülmeyi arttırıcı etkilerini kanıtlamaktadır.

Diğer taraftan bünyesel büzülmeyi etkileyen, ancak kimyasal olmayan etkiler de vardır. Bu açıdan "kimyasal büzülme" tanımını "bünyesel büzülme"den farklılaşmaktadır. Örneğin suyun bünyede hareketi, termal genleşme, agreganın büzülme kısıtlayıcı etkisi gibi fiziksel etkenler de bünyesel büzülme şiddetinde rol

oynamaktadır (Barcelo, Moranville ve Clavaud, 2005). Suyun bünye içinde farklı boyutlardaki kapiler boşluklarda hareketi de, içsel bir büzülme meydana getirmekte, bu olaya kendi kendine kuruma (self-dessication) adı verilmektedir. Beyea ve diğerlerine (1998) göre, hidrasyon reaksiyonları için harcanan suyun boşalttığı çok küçük kapiler boşluklara (2,5 nm), daha iri kapiler boşluklardan (50 nm) su geçişi olması, iri kapiler boşluklarda bünyesel büzülmeye neden olmaktadır (Şekil 2.68). Bu büzülme mekanizmasında dışarıdan su alışverişi yoktur.

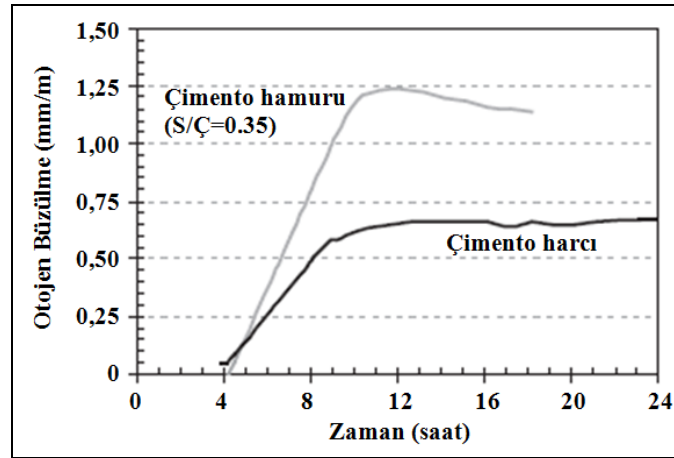


Şekil 2.67 Süperakışkanlaştırıcı katkı dozajının erken yaşlarda bünyesel büzülmeye etkisi (Holt ve Leivo, 2004).



Şekil 2.68 Suyun iri kapiler boşluklardan çekilmesi ile meydana gelen kendi kendine büzülme mekanizması (Beyea ve diğer., 1998).

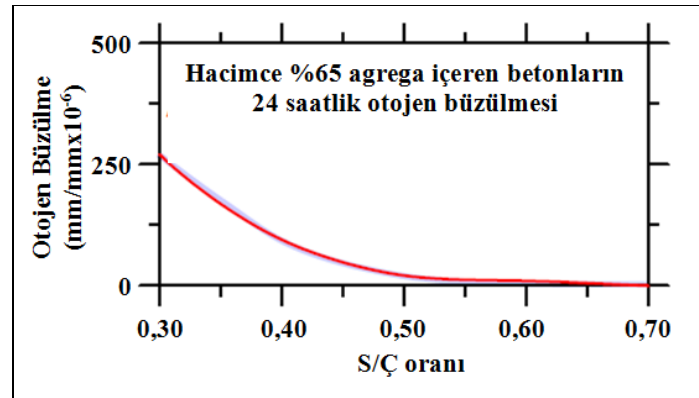
Agreganın erken yaşlarda bünyesel büzülmeyi azaltmadaki rolü Şekil 2.69’da görülmektedir (Holt, 2005, Larson, 2006). Agreganın sistemde olması aynı zamanda ekzotermik hidratasyon reaksiyonlarından kaynaklanan şekil değişimlerini de sınırlamaktadır.



Şekil 2.69 Agreganın erken yaşlarda bünyesel büzülmeyi önleyici etkisi (Holt, 2005).

Bünyesel büzülme normal dayanım sınıflarında ve S/Ç oranı 0,50’nin üzerindeki betonlarda ihmal edilebilecek kadar azdır (Şekil 2.70). Yapılan araştırmalar normal dayanım sınıfındaki betonlar için 1 aylık ve 5 yıllık bünyesel büzülmenin sırasıyla 40×10^{-6} ve 100×10^{-6} mertebelerinde olduğunu göstermiştir (Pease, 2005). Bu değerler kuruma büzülmesi yanında ihmal edilecek kadar düşüktür (Zhang, Tam ve Leow, 2003). Diğer taraftan bünyesel büzülme ise, düşük S/Ç (0,30-0,40) oranına sahip yüksek performanslı betonlarda önem kazanır (Burrows, Kepler, Hurcomb, Schaffer ve Sellers, 2004, Pease, 2005). Özellikle S/Ç oranının 0,42’nin altına indirilmesi bünyesel büzülmenin etkisini hızla arttırmaktadır. Çok düşük S/Ç oranlarında ($\sim 0,17$), 700×10^{-6} değerinde bünyesel büzülme ölçüldüğü rapor edilmiştir (Zhang, Tam ve Leow, 2003). Son yıllarda trend, S/Ç oranını düşürerek, silika dumanı gibi etkili mineral katkılarla geçirimsizlik sağlayarak, dayanım ve dayanıklılık performansları yüksek beton üretimine kaymıştır. Ancak bu tür yüksek performanslı betonlarda özellikle erken yaşlarda çatlak hassasiyeti de artmaktadır. Bu betonlarda hidrate çimento hamurunda bol miktarda çok küçük boyutlu kapiler boşluklar

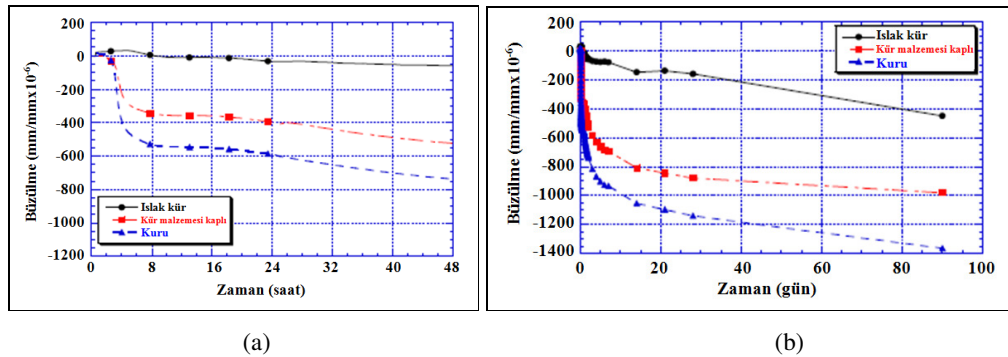
meydana gelir. Bu boşluklara, iri kapiler boşluklardaki suyun hareketi ile dış ortama bir su çıkışı olmaksızın kendi kendine büzülme (self-dessication) meydana gelir. İri kapiler boşluklardaki su klasik kuruma etkisinde olduğu gibi dış ortama değil, daha küçük kapiler boşluklara geçer. Böylece iri kapiler boşluklar boşalarak büzülür. Eğer dış ortamdan özellikle erken yaşlarda nem desteği yapılırsa (kür) yüksek dayanımlı betonlarda otojen büzülmenin etkisi hafifletilmiş olacaktır (Collepardi, Borsoi, Collepardi, Olagot ve Troli, 2005).



Şekil 2.70 Farklı S/Ç oranına sahip betonlarda ilk 24 saatteki bünyesel (otojen) büzülme (agrega hacmi sabit %65) (Pease, 2005).

Bünyesel büzülmenin önemli bir kısmı ilk 24 saatte gerçekleşmektedir. Daha sonra da hidrasyon reaksiyonlarının gelişimi nedeniyle bünyesel büzülme azalan şiddette devam etmektedir. Ancak uygulamada çimento bazlı malzemelerin dış ortamla sürekli nem alışverişinde olması, uzun süreli bünyesel büzülmenin kuruma büzülmesi ile iç içe girmesine neden olmaktadır. Şekil 2.71'de bu olayın üç farklı kür koşulundaki (ıslak bezle suya doymun kür, kür malzemesi kaplı ve kuru ortamda kür (25°C, %50 Bağıl nem)) yüksek dayanımlı beton örneklerde (28 günlük suda kürlü basınç dayanımı 70 MPa) incelendiği bir çalışmanın sonuçları sunulmuştur. Beton bileşenleri 640 kg/m³ çimento, 71 kg/m³ silis dumanı, 455 kg/m³ ince agrega, 1022 kg/m³ iri agrega, 207 kg/m³ sudan oluşmaktadır. Hava sürükleyici katkı (%0,13) ve süperakışkanlaştırıcı (%1,4) da kullanılan karışımın çökme değeri 64 mm'dir (Nassif, Suksawang, Maqbool, 2003). Yüksek dayanımlı olan bu beton karışımının erken yaşlardaki büzülme değerleri, dıştan nem desteği verilirse oldukça düşük seviyelere indirilmektedir (Şekil 2.71-a). Bu çalışmada yüzeye sürülen kür malzemesinin sadece

nem alışverişini kestiği, sisteme su desteği yapmadığı dikkate alındığında, erken yaşlarda kendiliğinden kurumunun otojen büzülme için ne derece önemli olduğu anlaşılmaktadır. İlk 28 gün boyunca sözü edilen kür işlemleri uygulandıktan sonra tüm örnekler kurumaya bırakılmış ve 90 günlük büzülme değerleri ölçülmüştür (Şekil 2.71-b). 28-90 gün arasında büzülme değerlerinin gelişimi incelendiğinde, kurumunun, ilk 28 günde kür edilmiş örnekte büzülmeyi daha hızlı arttırdığı görülmektedir. Ancak bu artışla, erken yaşlarda da kuruma etkisinde kalmış örnekteki toplam büzülme değerine ulaşamamaktadır (Nassif ve diğer., 2003).



Şekil 2.71 Erken yaşlarda ve uzun vadede yüksek dayanımlı betonun farklı kür koşullarında büzülmesi (Nassif ve diğer., 2003).

Yüksek dayanımlı betonlarda ($S/C=0,35-0,45$) yapılan araştırmalar, hem erken yaşlarda hem de uzun vadedeki bünyesel büzülme kaynaklı çatlakların azaltılmasında kürün önemini vurgulamaktadır (Tablo 2.6) (Holt ve Leivo, 2004). Yüksek dayanımlı betondaki göreceli olarak yüksek hidrasyon ısı, sahada buharlaşma hızını da arttıracığından, korunmayan betonda nem kaybı kaynaklı büzülme de dolaylı olarak artacaktır.

Bir şekilde bünyesel nem içeriğini koruyucu ya da destekleyici önlem almak da yüksek dayanımlı betonların bünyesel büzülmesini azaltmada faydalı olmaktadır. Bu amaçla neme doymun hafif agrega kullanımı ve süperabsorbent polimer kullanımı gündeme gelmektedir.

Pomza, genişletilmiş kil, vb. hafif taneler suya doyurulup kullanılarak bünyesel büzülme şiddeti azaltılabilir (Mönnig ve Reinhardt, 2006, Craeye ve Schutter, 2006,

Akçay ve Taşdemir, 2006, Akçay ve Taşdemir, 2008, Zhutowsky, Kovler ve Bentur, 2004). Ancak bu tür ilaveler aynı zamanda mekanik özelliklerde azalmaya neden olduğu için, etkinlik dereceleri kullanım oranları ile ilişkilidir. Diğer taraftan bu tür düşük elastisite modüllü malzemelerin sisteme girişi, agrega ikamesi ile olursa kuruma büzülmesini kısıtlama derecesi düşeceğinden uzun süreli büzülme problemi ortaya çıkabilir. Çelişkili şekilde agreganın elastisite modülünün düşüklüğü, büzülme çatlağı riskini azaltmaktadır. Hooke yasasına göre serbest büzülme deformasyonu kısıtlandığında, oluşacak parazit gerilmeyi elastisite modülünün değeri doğrusal olarak etkilemektedir.

Son yıllarda bünyesel büzülmenin azaltılmasına yönelik olarak süperabsorbent polimerlerin (SAP) kullanımı üzerine çalışmalar yapılmaktadır (Lura, Durand ve Jensen, 2006). Bu polimerler çapraz bağlı akrilamit/akrilik asit kopolimeri kökenli olup, 50-250 mikron çaplı küresel tanecikler halinde üretilmektedir. Hacimlerinin birkaç misli su emerek şişebilme özelliği olan, bu polimerlerin bünyesel büzülmeyi azaltmada oldukça etkili oldukları söylenebilir. Ancak kullanım oranı arttıkça mekanik özellikleri düşürdüğü de dikkate alınmalıdır (Igarashi ve Watanabe, 2006).

Tablo 2.6 Yüksek dayanımlı betonlarda hem erken yaşlarda hem de uzun vadedeki bünyesel büzülme kaynaklı çatlakların azaltılmasında kürün önemi (Holt ve Leivo, 2004).

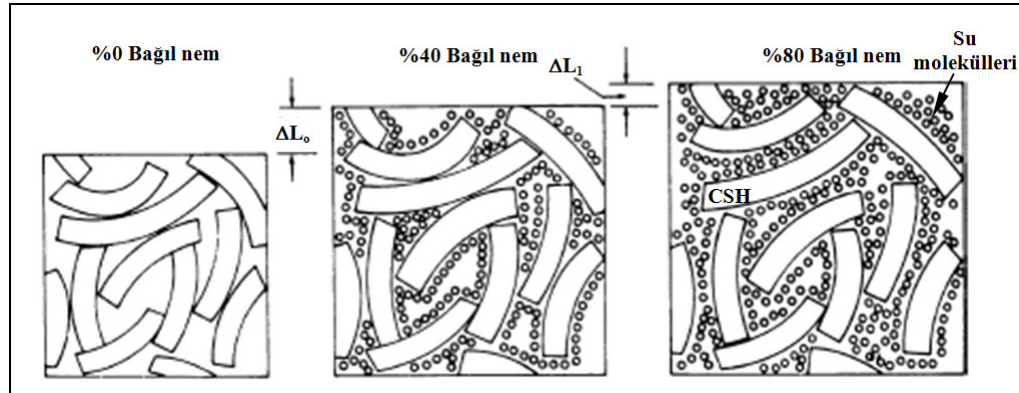
S/Ç	Kür uygulaması	Betona yapılan ilaveler ve notlar	Erken yaşlarda büzülme		Çatlama riski
			Otojen	Kuruma kaynaklı	
>0,45	Erken başlayan etkili kür	-	-	-	Yok
>0,45	var	Priz süresinde gecikme	-	+	Düşük
>0,45	Zayıf kür, hızlı buharlaşma	-	-	+++	Yüksek
<0,40	Erken başlayan etkili kür	-	+	-	Düşük
<0,40	Zayıf kür, hızlı buharlaşma	-	+	+++	Yüksek
<0,40	Erken başlayan etkili kür	Silis dumanı	++	-	Orta
<0,40	Erken başlayan etkili kür	Yüksek süperakışkanlaştırıcı dozajı	++	-	Orta
<0,35	Erken başlayan etkili kür	-	++	-	Orta
<0,35	Zayıf kür, hızlı buharlaşma	-	++	+++	Yüksek
<0,35	Zayıf kür, hızlı buharlaşma	Silis dumanı ve yüksek süperakışkanlaştırıcı dozajı	+++	+++	Çok yüksek

* Büzülme miktarı kabul edilebilirden (+) çok yükseğe (+++) kadar sınıflandırılmıştır.

2.5.1.3 Kuruma Büzülmesi (Hidrolik Büzülme)

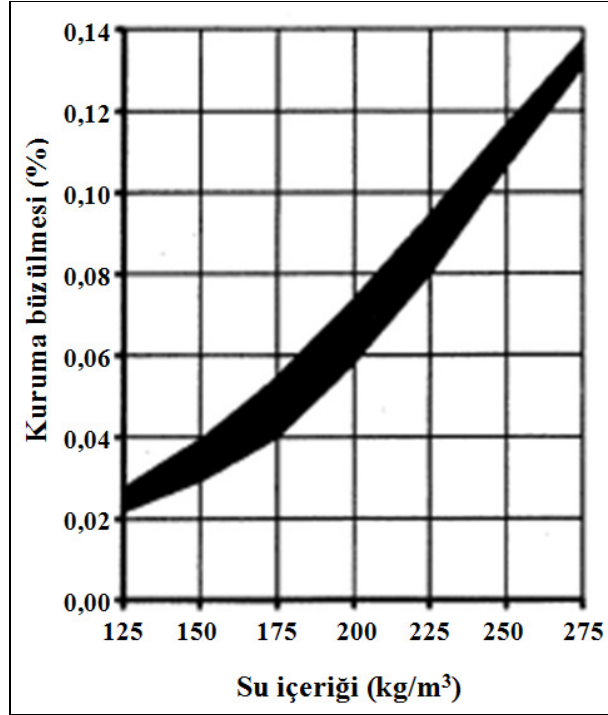
Kuruma büzülmesi, betondan nem kaybı nedeniyle gerçekleşen büzülme olarak tanımlanmaktadır (ACI 116R). Geçmiş yıllarda kuruma büzülmesi terimi hem bünyesel hem de kuruma büzülmesi için birlikte kullanılmaktaydı. Bunun en önemli nedeni geçmişte yüksek dayanımlı ve düşük S/Ç oranlı betonların sıklıkla kullanılmamasıdır. Kullanılan betonlarda bünyesel büzülme ihmal edilebilecek kadar düşük mertebelere sahiptir. Geleneksel beton açısından, büzülme mekanizmalarından en önemlisi kuruma büzülmesidir.

Çimentolu malzemedeki kuruma büzülmesi esas olarak, sertleşmiş çimento hamurundaki hidrate kalsiyum silikat (CSH) jelinin nemini kaybederek birbirine yaklaşması ile oluşur. Suyu doygun çimento hamuru, doygunluğunun altındaki nem oranına sahip çevre koşullarında boyutsal olarak stabil kalmaz. Şekil 2.72’de görüldüğü gibi, CSH jeli nem azalınca fiziksel olarak absorbe ettiği suyu kaybeder ve bu durum büzülmeye yol açar (Kovler ve Zhutovsky, 2006). Çimento hamurunun kuruması sonucu, önce kılcal boşluklardaki su buharlaşmakta, bu boşluklara jel suyu akımı başlamakta ve daha sonra bu su da kısmen buharlaşmaktadır. Sonuçta absorbe su tabakası incelerek ve taneler yaklaşarak hacim büzülmeaktadır. Farklı bağıl nem derecelerinde farklı kuruma mekanizmaları kuruma büzülmesinin gelişiminde rol oynar (Ramyar, 2002).



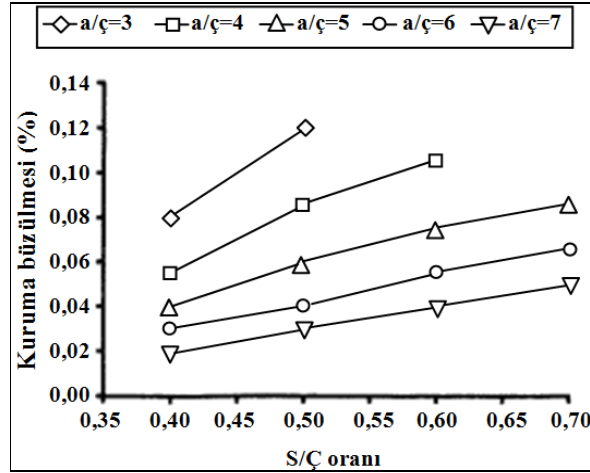
Şekil 2.72 Hidrate kalsiyum silikat (CSH) jelinin farklı nem koşullarında nemini kaybederek birbirine yaklaşması ile büzülme (Kovler ve Zhutovsky, 2006).

Kuruma büzülmesinde en etkili malzeme parametreleri S/Ç oranı, karışım suyu miktarı ve karışımdaki agrega oranıdır. Şekil 2.73 ve 2.74’de verilen deney sonuçlarından görüldüğü gibi, S/Ç oranı ve karışım suyu miktarı arttıkça kapiler boşluk oranı artacağı için kuruma büzülmesi de artar (D’Souza, 2000).

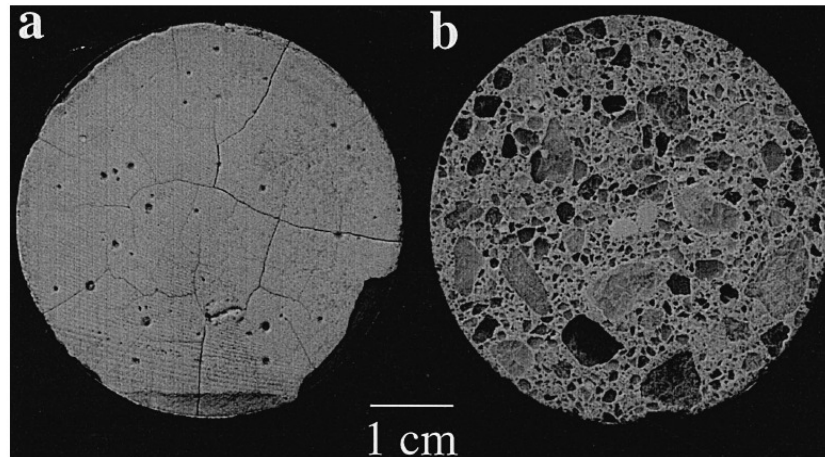


Şekil 2.73 Karışım suyu miktarının kuruma büzülmesine etkisi (D’Souza, 2000).

Agreganın büzülmeyi kısıtlayıcı etkisi, farklı S/Ç oranındaki betonlar için Şekil 2.74’de verilmiştir (D’Souza, 2000, Banthia ve Gupta, baskıda). Agrega miktarını arttırmak hem kısıtlayıcı etkisi, hem de çimento hamuru hacmini azaltıcı etkisi nedeniyle kuruma büzülmesini büyük ölçüde azaltır (Eguchi ve Teranishi, 2005). Kısıtlı durumdaki betonda ise, agrega çatlak ilerlemesini önler ve hem yüzeyde hem de derinlik boyunca çatlağı yayıcı vazife görerek kuruma büzülmesi çatlaklarını engellemekte etkilidir (Shitani, Bisschop ve Van-Mier, 2003). Şekil 2.75’de söz konusu çalışmada elde edilen sonuçları görsel olarak açıklayan bir örnek verilmiştir.

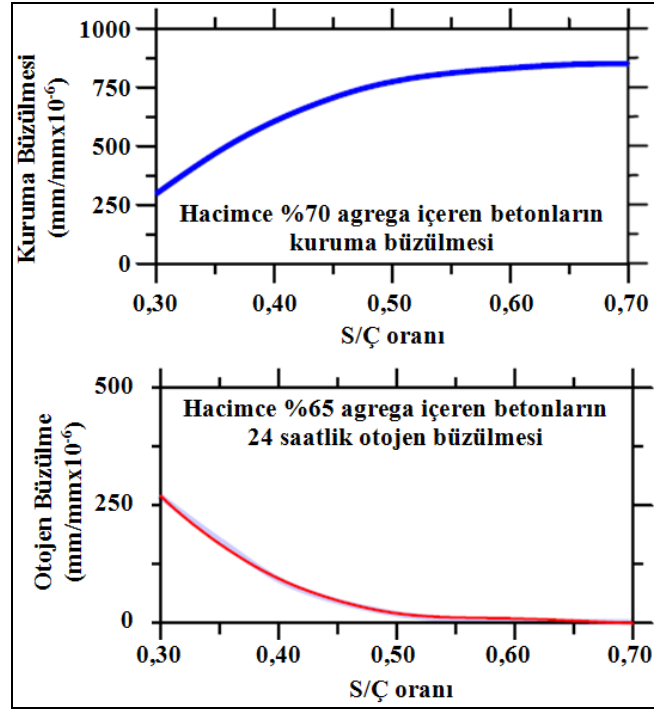


Şekil 2.74 S/Ç oranı ve agrega miktarının kuruma büzülmesine etkisi (D'Souza, 2000).



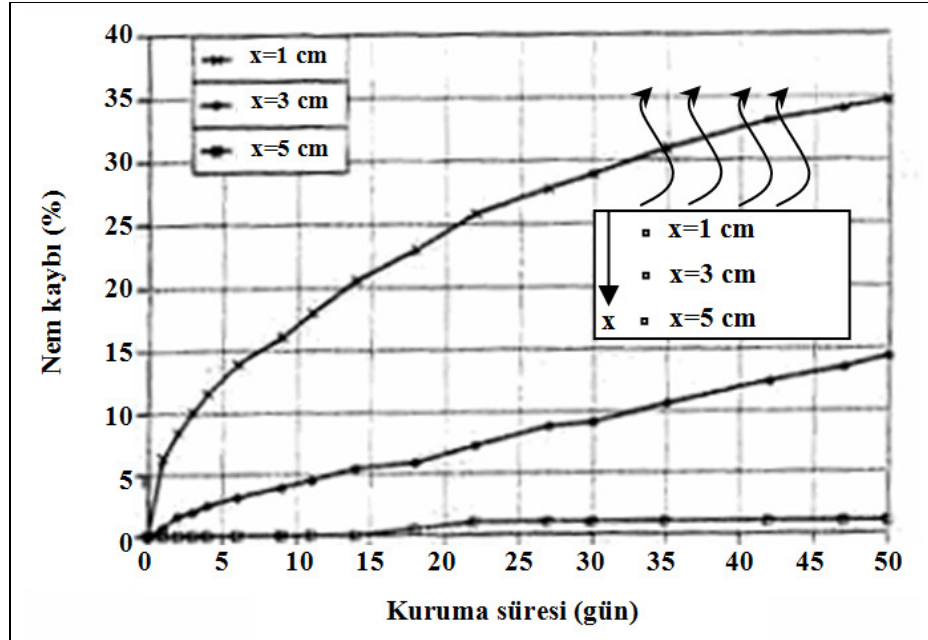
Şekil 2.75 Altı ay boyunca kurutulmuş çimento hamuru ve 14 mm en büyük tane boyutlu agrega ile hazırlanan beton (Shitani, Bisschop ve Van-Mier, 2003).

Şekil 2.76'da verilen grafiklerde benzer ince agrega/iri agrega oranına sahip karışımların, S/Ç oranı değişimi ile kuruma büzülmesi ve bünyesel büzülme değerlerinin değişimi görülmektedir. Kuruma büzülmesi S/Ç oranının artışı ile artarken, bünyesel büzülme azalmaktadır. Toplam büzülme dikkate alındığında, en uygun S/Ç oranının 0,50-0,55 olduğu görülmektedir (Pease, 2005).



Şekil 2.76 Benzer ince agregre/iri agregre oranına sahip karışımların S/Ç oranı değişimi ile kuruma büzülmesi ve bünyesel büzülme değerleri (Pease, 2005).

Kuruma büzülmesinin şiddetini etkileyen diğer bir parametre de çimento bazlı kompozit elemanın boyut ve şekil özellikleridir. Elemanın yüzey alanı/hacim oranının fazlalığı, malzemeden su kaybını ve dolayısıyla kuruma büzülmesini hızlandırır. Büyük kütleli veya nem geçirimsizliği düşük elemanlarda ise derinlikle su kaybı azalmaktadır. Örneğin, tamir harcının nem kaybı, kuruma yüzeyine yakın bölgede hızlıdır, yüzeyden uzaklaştıkça nem kaybı yavaşlamaktadır. Asad, Baluch ve Al-Gadhib (1997)'nin çalışmasında, nem difüzyonuna uğrayan örneklerin kuruma yüzeyinden farklı derinliklerdeki (1, 3, 5 cm) zamana bağlı nem kayıpları Şekil 2.77'de görülmektedir.



Şekil 2.77 Farklı derinliklerdeki nem kaybı - kuruma zamanı ilişkisi (Asad ve diğer., 1997).

2.5.1.3.1 Kuruma Büzülmesini Azaltmaya Yönelik Mineral Katkıların Kullanımı. Çimento hamurunda puzolanik özellikleri nedeniyle, çimento ile ikame edilerek kullanılan mineral katkıları bazı istisnalar dışında, çoğunlukla kuruma büzülmesini azaltıcı etki yaparlar. Çünkü sistemdeki çimento miktarını ve kapiller boşlukları azaltıcı etkileri bulunmaktadır. Örneğin, uçucu külün kimyasal yapısına ve ikame oranına bağlı olarak kuruma büzülmesini hem azaltıcı hem de artırıcı etkisinin olabileceği rapor edilmiştir (Banthia ve Gupta, baskıda, Mokarem, Weyers ve Lane, 2005, Akkaya, Ouyang ve Shah, 2007). Silis dumanı ve metakaolin ise çoğunlukla kuruma büzülmesini arttırmaktadır (Löfgren ve Esping, 2006). Bu durum silis dumanı ve metakaolinin çok ince yapılarından ve hidrasyon derecesini artırıcı etkilerinden kaynaklanmaktadır (Brooks ve Johari, 2001). Son yıllarda kendiliğinden yerleşen beton üretiminde karışıma ilave edilen kireçtaşı tozu da herhangi bir puzolanik özelliği olmamasına rağmen, kuruma büzülmesini etkileyebilmektedir (Bouasker, Mounanga, Turcry, Loukili ve Khelidj, 2007). Kireçtaşı tozu ile hamur hacmi zenginleştirilmiş kendiliğinden yerleşen beton karışımları, geleneksel betona göre daha fazla büzülmemektedir. Ancak çatlak hassasiyeti açısından bu betonların çok farklı olmadığı bazı araştırmacılar tarafından iddia edilmiştir (Heirman ve diğer., 2008, Loser ve Leemann, 2009, Schiessl ve Rucker, 2005). Bu durum kireçtaşı tozu

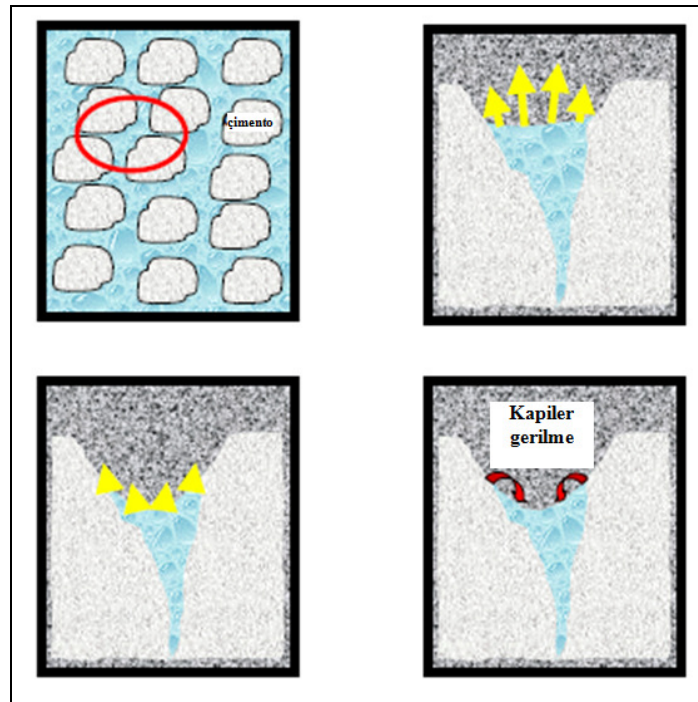
içeren kendiliğinden yerleşen beton karışımlarının, daha fazla sünme yapabilme yeteneklerine bağlanmıştır. Dolayısıyla tek başına büzülme miktarı çatlak hassasiyeti açısından yeterli olmayıp kısıtlı durumdaki performans da önem kazanmaktadır. Yüksek fırın cürufunun büzülme çatlakları önleyici etkisi, Aly ve Sanjayan (2008) tarafından elastisite modülünü düşürmesine bağlanmıştır. Ayrıca ilk 7 gündeki nemli kürde örneklerde meydana gelen şişme miktarı, cürufsuz örneklerden 2-3 misli fazladır.

2.5.1.3.2 Kuruma Büzülmesini Azaltmaya Yönelik Büzülme Azaltıcı Kimyasal Katkıların Kullanımı. Büzülme azaltıcı kimyasal katkıları, etki mekanizmalarına göre iki gruba ayırmak mümkündür. Sertleşmiş çimento harcında boşluk suyunun yüzey gerilimini düşürerek, kuruma sırasında kapiler boşlukların birbirine yaklaşma derecesini azaltan katkılar ilk gruba girmektedir. Bu katkılar betonda kuruma büzülmesini azaltmak amacıyla kullanılır. Genellikle propilen glikol türevlerinin karışımından oluşan bu katkılar çimento ağırlığının %1-10'u arasında kullanılabilir (He, Li, Chen, Liang, 2006, Lura, Mazzotta, Rajabipour ve Weiss, 2006, Pease, 2005). Japonya'da 80'li yıllarda geliştirilen bu katkılar 90'larda ABD'de de kullanılmaya başlanmıştır. Tavsiye edilen kullanım oranlarında (%2-4) betonun boşluk suyunun yüzey gerilimini %50'ye kadar azaltma özellikleri vardır (D'Souza, 2000). Ancak maliyetleri oldukça yüksektir. Betonun boşluklu yapıda olması ve boşluk boyut dağılımının geniş bir aralığa yayılmış olması, boşluk suyu yüzey gerilimindeki değişikliklerden etkilenmesine neden olur. Yarı doymuş beton örneklerinde, boşlukların teorik olarak silindirik formda olduğu kabulü ile kapiler gerilmeler şu şekilde ifade edilebilir (Bentz, 2006):

$$\sigma_{cap} = \frac{2\gamma_{lg} \cos \alpha}{r} \quad (2.35)$$

burada; σ_{cap} : Kapiler gerilme, γ_{lg} : Boşluk suyunun yüzey gerilimi, α : boşluk suyu ile katı arasındaki temas açısı (genellikle 0° olarak kabul edilir) ve r: Su dolu en büyük boşluk çapıdır.

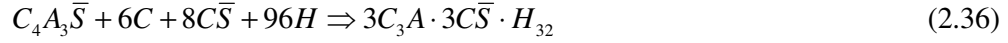
Distile su ve %10 büzülme azaltıcı kimyasal katkı içeren su kullanılarak çimento hamuru yüzeylerinde yapılan temas açısı ölçümlerinde sırasıyla 28° ve 7° 'lik açılar elde edilmiştir. Temas açısının azalması yüzey geriliminin düşmesi anlamına gelmektedir. Yüzey gerilimindeki değişim kapiler boşluklarda kapanmaya yol açacaktır (Bentz, 2006, D'Souza, 2000). Büzülme azaltıcı kimyasal katkılar suyun bünyeden kaçışını engellemekte, kaçışı sırasında kapiler boşluk yüzeylerinde yarattıkları büzülme etkisini azaltmaktadırlar (Collepardi ve diğer., 2005). Söz konusu etki Şekil 2.78'de şematize edilmiştir.



Şekil 2.78 Boşluk suyu yüzey gerilimini azaltarak büzülme önleyici kimyasal katkıların etki mekanizması (Collepardi ve diğer., 2005).

2.5.1.3.3 Kuruma Büzülmesini Azaltmaya Yönelik Genleşen Karakterde Ürün Oluşturan Katkıların Kullanımı. Bu tür katkılar suyla veya hidratasyon ürünleri ile erken yaşlarda reaksiyona girerek genleşen karakterde ürün oluşumunu sağlamaktadır. Serbest halde betonun hacmini arttıran bu reaksiyonlar, kısıtlı durumda beton bünyesinde ön basınç gerilmesi oluşturmaktadır. Böylece büzülme etkisinin iç yapıda çekme gerilmesi yaratma potansiyeli azalmış olur. Sözü edilen

katkılar aşağıdaki reaksiyonlar sonucu etrenjit veya kalsiyum hidroksit oluşturarak işlev görür:



Reaksiyonlar, sülfü alüminat, kireç ve alçıtaşının birleşerek etrenjite dönüşümü ile serbest kirecin kalsiyum hidroksite dönüşümü olarak açıklanabilir (Collepari ve diğer., 2005, Schwartzentruber ve diğer., 2004, Keith, Bentley, Walker ve Holland, 2006). Bu tür katkıların kullanım dozajı önem kazanmakta, yüksek kullanım oranında iç yapıda aşırı genleşmeden hasar yaratma riski olacağından dikkatli olunmalıdır.

2.5.1.4 Termik Büzülme

Termik büzülme, çimento bazlı malzemeler sertleşmiş veya taze halde iken ortaya çıkabilir. Malzeme sertleşmiş halde iken meydana gelebilecek sıcaklık azalmalarında örnek serbest ise büzülme meydana gelmektedir. Termik büzülme miktarı malzemenin termik genleşme katsayısı ile ilişkilidir. Çimento bazlı malzeme taze halde iken ise büzülme çimentonun hidratasyon ısısı ile ilişkilidir. Prizi sona eren ve sertleşmeye başlayan betonda, hidratasyon ısısının tüm kütleyi ısıtmaya yetecek şekilde artmaması sonucu kütle soğumakta ve termik büzülme adı verilen olay meydana gelmektedir. Bir iki gün içinde ortaya çıkan bu olay özellikle baraj gibi kütle betonlarında önemli sorunlar çıkarmaktadır. İç kısımdaki beton yavaş, dış kısımdaki beton hızlı soğur. Sonuçta dış kısımdaki betonun büzülmesi önlenmiş olur, bu önleme ise çekme gerilmeleri doğurup, betonu çatlatır.

2.5.1.5 Karbonatlaşma Büzülmesi

Karbonatlaşma büzülmesi, sertleşmiş çimento hamurunun CO₂ ile kimyasal reaksiyonu sonucu oluşur. Atmosferdeki CO₂ miktarı (yaklaşık %0,04), uzun zaman

içinde çimento hamurunun yüzeyinde reaksiyona girer. Bu reaksiyonları, karbonatlaşma büzülmesi izler.



Rutubetin çok yüksek olduğu ortamlarda CO₂ difüzyonu oluşmaz. Karbonatlaşmaya uğramış beton, su kaybederek büzülür. Büzülme ve nem kaybı arasındaki ilişki, normal kurumada gözlenen ilişkiye benzer. CSH'nin karbonatlaşması bağlayıcılık özelliğini değiştirir ve karbonatlaşma büzülmesi tamamen geri dönüşsüzdür.

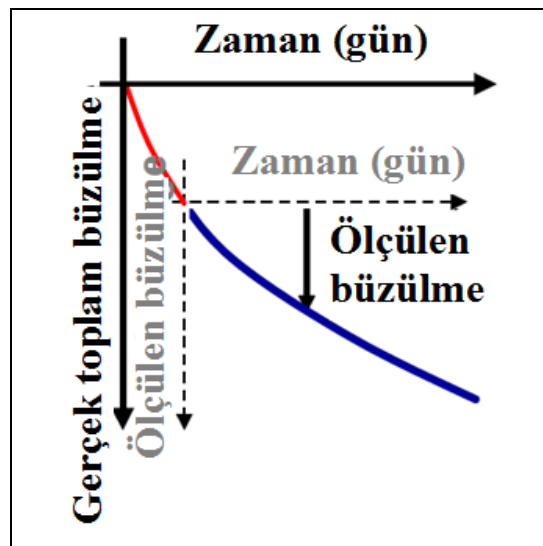
2.5.2 Çimento Bazlı Kompozitlerde Büzülme Miktarının Ölçümü

Çimento bazlı malzemelerde büzülme miktarı çoğunlukla serbest büzülme ölçüm yöntemleriyle belirlenir. Örneği kısıtlayarak gerilme ölçümü yapılan yöntemler de mevcuttur. Ölçüm yöntemleri kısa süreli (ilk 24 saat) ve uzun süreli olmak üzere iki farklı zaman aralığında gruplandırılabilir. Öncelikle uzun süreli yöntemler açıklanacaktır.

2.5.2.1 Uzun Süreli Yöntemler

Ölçümler, standart boyutlardaki prizma örneklerinin dökülerek, 24 saat sonra kalıptan çıkarılması ve standart koşullarda muhafaza edilen örneklerdeki boy değişimlerinin gözlenmesiyle yapılır. Örnek uçlarına döküm sırasında ankre edilen çubuklar yardımıyla, komparatör kullanılarak boy ölçümü yapılır veya örnek yüzeyine gömülen ankraj vidaları arasındaki mesafe zaman bağlı olarak ölçülür. Şekil 2.79'da görüldüğü gibi ölçümlerde ilk 24 saatteki büzülme dikkate alınmamaktadır (Pease, 2005). Elde edilen büzülme değerleri, toplam büzülme (kuruma+24 saatten sonraki bünyesel büzülme toplamı) olarak adlandırılabilir. ASTM C490 standardına göre, 25*25*285 mm ayrıtlı örnek ilk 1 gün nem kaybı engellenecek şekilde korunduktan sonra, kalıptan çıkartılır ve ilk ölçümü alınıp 23±1°C'de %50±4 bağıl nemde 28 ve 90 günlük büzülme değerleri ölçülür

(Mokarem, Weyers ve Lane, 2005). Mokarem ve diğerlerine (2005) göre, beton için büzülme limitleri 28. ve 90. gün için sırasıyla 300×10^{-6} ve 400×10^{-6} 'dır. Büzülme deneylerinde küçük boyutlu örneklerin kullanılması, örneğin göstereceği son büzülme değerinin büyük bir kısmına erken yaşta ulaşılmasını sağlar. Daha düşük yüzey alanı/hacim oranına sahip, nispeten büyük boyutlu örneklerin büzülmesinin daha fazla süre gerektireceği açıktır. Bu nedenle standartlarda küçük boyutlu örnekler kullanılır ve genellikle 28 ve 90 günlük kuruma büzülmesi için sınır değerler önerilir.



Şekil 2.79 ASTM C490 standardına göre büzülme ölçümünde başlangıç noktası (Pease, 2005).

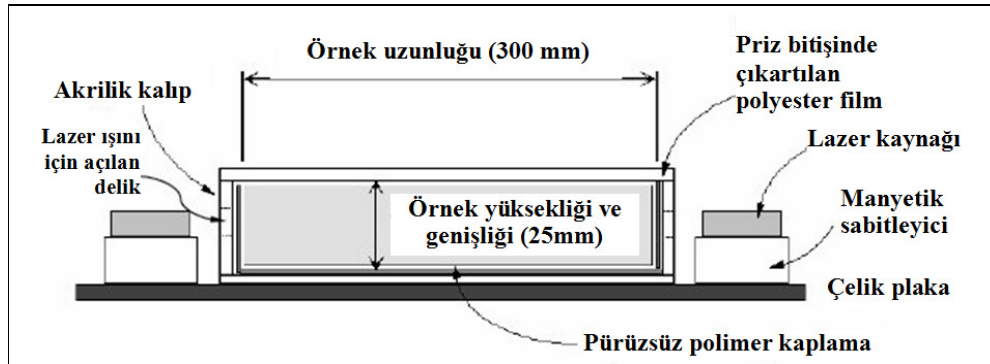
Beton için uzun dönemli kuruma büzülmesinin tahmini amacıyla pek çok model geliştirilmiştir. Bu modeller zamanın fonksiyonu olarak büzülme gelişimini vermektedir. Bazı modellerde ortam koşulları, örnek boyutları vb. parametreler belli katsayılarla modellere yansıtılmaktadır. En çok kabul görenleri; ACI 209 Code Modeli, CEB90 Code Modeli, Bazant B3 Modeli, Gardner/Lockman Modeli ve Sakata Modeli olarak sıralanabilir (Mokarem ve diğer., 2005).

2.5.2.2 Kısa Süreli Yöntemler

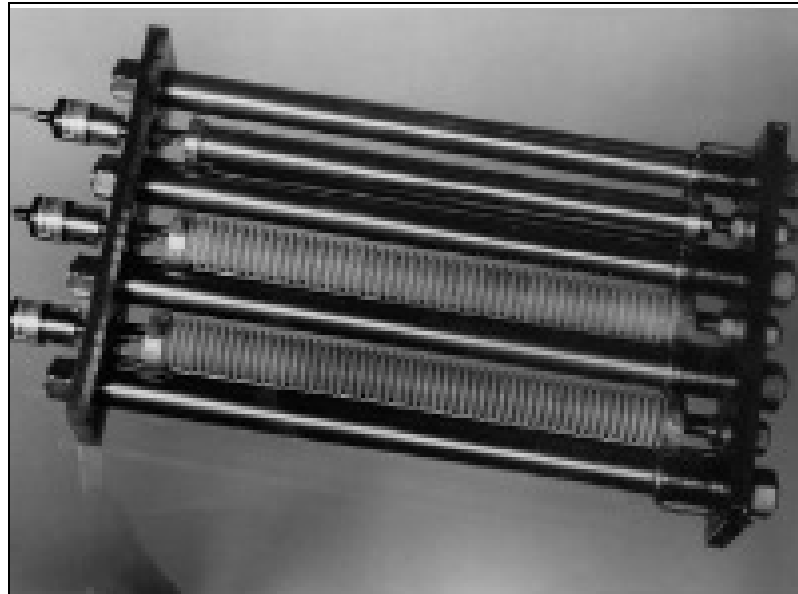
İlk 24 saatte meydana gelen şekil değişimleri, günümüz beton teknolojisinde kullanılan yüksek performanslı çimento bazlı kompozitler için önem kazanmıştır (Pease, 2005). Uzun süreli ölçüm yöntemlerinin tersine ilk 24 saatteki büzülme ölçümü için standartlaşmış bir yöntem bulunmamaktadır. İlk 24 saatteki büzülmenin kalıp içinde ölçümü son yıllarda üzerinde yoğun çalışmaların yapıldığı bir araştırma konusudur (Lura, Durand ve Jensen, 2006, Loukili, Chopin, Khelidj ve Touzo, 2000, Mounanga, Baroghel-Bouny, Loukili ve Khelidj, 2006). İlk 24 saatte nem alışverişi olacak şekilde ölçüm yapılırsa; ortam nemine, sıcaklık ve büzülme durumuna göre elde edilen sonuç, plastik büzülme ve erken bünyesel büzülme ile ilişkilendirilebilir. Nem alışverişi yoksa (kalıp içindeki malzemenin yüzeyi nem kaybını engelleyecek şekilde kaplanmışsa), elde edilecek sonuç erken bünyesel büzülme miktarı olacaktır (Burlion, Bourgeois, Shao, 2005). Newlands, Paine, Vemuri ve Dhir (2008) tarafından hazırlanan bir makalede, farklı yöntemlerin karşılaştırmalı bir listesi verilmiştir. Bu yöntemlerde çoğunlukla Şekil 2.80’de görüldüğü gibi, kalıp içinde taze örneğe gömülü bir pimin hareketi LVDT ile ölçülmektedir (Pane ve Hansen, 2008, Mokarem, Lane, Özyıldırım ve Sprinkel, 2008). Temel felsefe benzer olmakla, birlikte sürtünmeyi azaltmak amacıyla kalıp yüzeyini kaplama (Loukili ve diğer., 2000), kalıp yüzeyini azaltmak amacıyla kalıp kesitini değiştirme (Newlands, Paine, Vemuri ve Dhir, 2008), kalıbın içindeki taze örneğin kolay şekil değiştirebilmesi için kalıbı akordeon plastikten üretme (Mounanga ve diğer., 2006, Lura ve diğer., 2006) gibi yöntemler kullanılmaktadır (Şekil 2.81). Ancak tüm bu yöntemlerde kalıp içindeki taze harca temas edilerek ölçüm yapılmaktadır. Henüz plastik kıvamda olan bir malzeme için uygulanan her türlü temas, malzemenin yapacağı doğal hareketi etkilemektedir. Bu sorunu çözmek için, temas olmaksızın lazer sensörler kullanılarak erken yaş büzülme ölçümü üzerine çalışmalar yapılmıştır (Pease, 2005, Newlands ve diğer., 2008). Pease (2005) tarafından kullanılan yöntem modifiye edilerek bu tez kapsamında kullanılmıştır. Ayrıntılı bilgi 6. Bölüm’de sunulacaktır.

İlk 24 saatteki bünyesel şekil değişiminin ölçümünde hacimsel yöntemler de kullanılmaktadır. Bu amaçla çimento hamuru lateks balonlara doldurulup su içinde

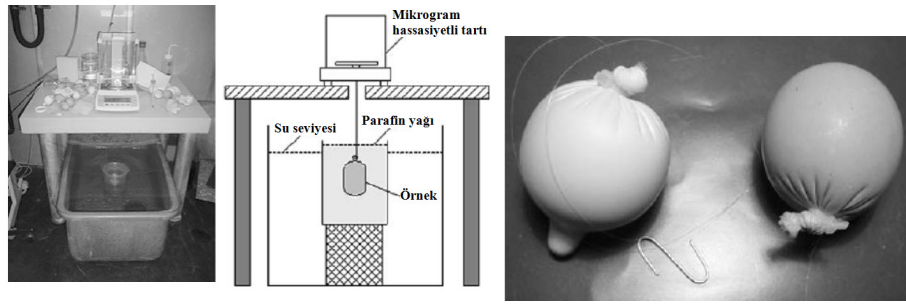
tartılır (Şekil 2.82). Hacimsel büzülme, Arşimet terazisi kullanılarak zamana bağlı olarak hacim değişimini takip etme yoluyla ölçülmektedir (Barcelo, Moranville ve Clavaud, 2005, Lura ve Jensen, 2007). Meydana gelen hacim değişimleri çok küçük mertebelerde olduğu için kullanılacak terazi mikrogram hassasiyetli olmalıdır. S/Ç oranı 0,30 olan çimento hamuru için yapılan ölçüm sonuçları Şekil 2.83’de verilmiştir (Barcelo, Moranville ve Clavaud, 2005).



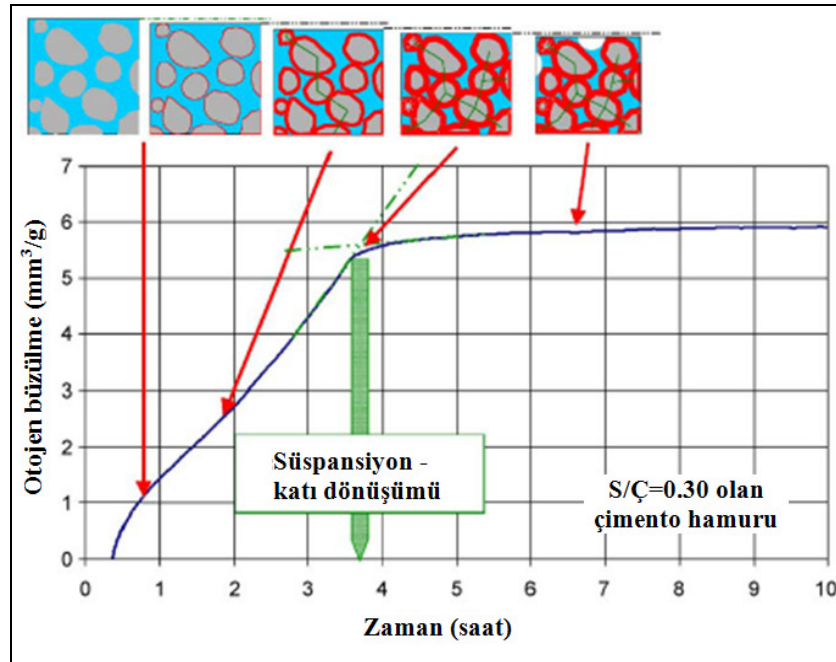
Şekil 2.80 İlk 24 saatteki büzülmenin kalıp içinde temaslı ölçümünde kullanılan yarı ankastre sistem (Pane ve Hansen, 2008).



Şekil 2.81 Akordeon şeklinde polimer kalıplara doldurulmuş taze çimento hamurunda boy değişimi ölçümü (Lura ve diğer., 2006).



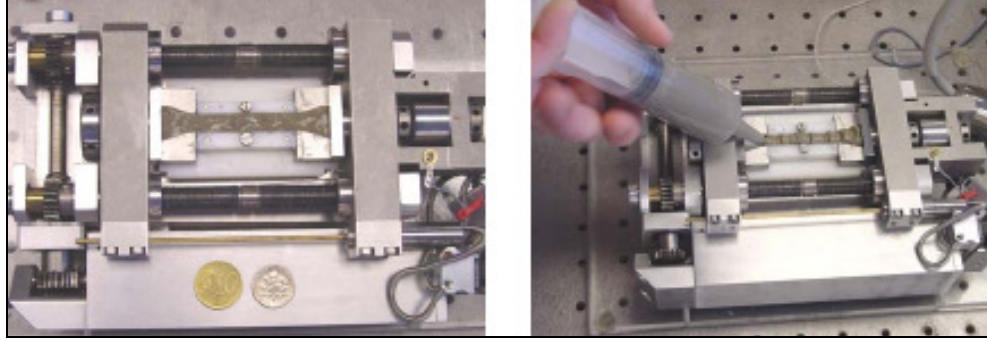
Şekil 2.82 Hacimsel büzülme ölçümünde kullanılan ölçüm düzeneği (Lura ve Jensen, 2007).



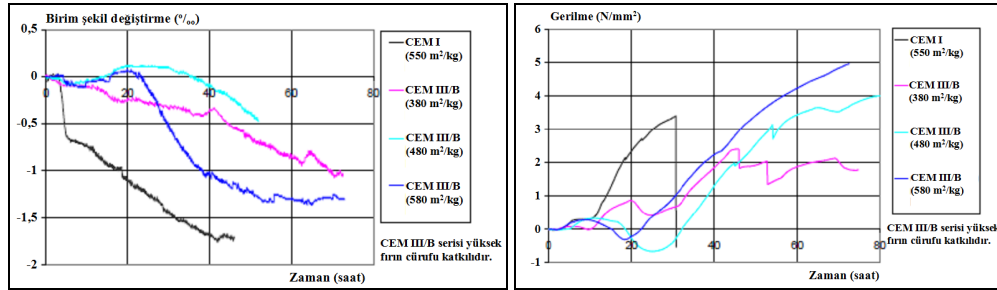
Şekil 2.83 S/Ç oranı 0,30 olan çimento hamuru için hacimsel yöntemle ölçülen bünyesel büzülme (Barcelo, Moranville ve Clavaud, 2005).

Serbest büzülmenin yanında, çimento bazlı kompozitlerin bünyesinde kısıtlı durumda oluşan gerilmelerin ölçüldüğü yöntemler de son yıllarda gelişmektedir (Bouasker, Mounanga, Turcry, Loukili ve Khelidj, 2007). Bu amaçla geliştirilmiş bir aparat Şekil 2.84'de verilmiştir. Hem serbest halde büzülme, hem de kısıtlı durumda meydana gelen gerilme bu aparat yardımı ile zamana bağlı olarak ölçülebilmektedir. Bünyesel büzülmenin ölçümü için örneklerin yüzeyleri alüminyum folyo ile kaplanmıştır. Farklı Blaine değerlerine sahip çimentolar kullanılarak hazırlanan çimento hamurlarının (S/Ç=0,35) sözü edilen aparat kullanılarak ölçülen büzülme değerleri ve ölçülen gerilmeler Şekil 2.85'de görülmektedir. Blaine değeri fazla olan

ve mineral katkı içermeyen çimento ile hazırlanan örnekte, diğer örneklerle kıyasla çok daha hızlı iç gerilme artışı meydana gelmiştir. Bu örnek 30. saatte çatladığı için gerilmeye bir boşalma olmuştur. Aynı cihaz beton için daha büyük boyutlu olarak da üretilmiştir (Braam, Ham ve Koenders, 2006).



Şekil 2.84 Serbest büzülme ve kısıtlı durumda gerilme ölçülen aparat (Bouasker ve diğer., 2007).



Şekil 2.85 Çimento hamurları için Blaine değerinin serbest büzölmeye ve kısıtlı durumda gerilme gelişimine etkisi (Bouasker ve diğer., 2007).

Kısıtlı durumda gerilme ölçümü için bir diğer alternatif de halka deneyleridir. Bu deneylerde çimento hamurunun doldurulduğu halka formundaki kalıbın iç kısmındaki çelik halkada meydana gelen deformasyon ölçölmektedir. Halka formundaki çimento hamuru büzöldükçe, çelik kalıbı sıkıştırdığı için kalıbın iç kısmında deformasyon artmaktadır. Halka örnek çatlayıncaya kadar ölçöme devam edilmekte, daha sonra çatlak genişliği ölçöme yapılarak sonuçlar yorumlanmaktadır (He, Zhou ve Li, 2004, Ma ve Hooton, 2006, Barluenga ve Olivares, 2007).

BÖLÜM ÜÇ

MİKRO AGREGA KARAKTERİZASYONU VE MİKRO BETONUN REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Bu bölümde, mikro beton karışımlarında kullanılacak mikro agreganın fiziksel özelliklerinin (tane boyutu, incelik, tane şekli, yüzey özellikleri vb.) belirlenmesine yönelik ön deneyler gerçekleştirilmiştir. Farklı mikro beton karışımlarının üretilmesinde önemli bir etken olan, mikro betonların taze haldeki reolojik özellikleri de, kapsamlı şekilde ele alınmıştır. Mikro betonun reolojik karakterizasyonuna yönelik olarak, hem basit işlenebilirlik deneyleri, hem de reometre kullanılarak incelemeler yapılmıştır. Mikro beton karışımlarının reolojik açıdan diğer çimento bazlı malzemelerden farklılıkları tartışılmıştır. Bölüm kapsamında gerçekleştirilen deneyler ve incelenen parametreler “*Birinci Bölüm*”de sunulan akış şemasından takip edilebilir.

3.1 Mikro Agreganın Özelliklerinin Mikro Beton Performansına Etkileri

Bu bölümde, kullanılan toz malzemenin (mikro agreganın) tane boyut dağılımı ve morfolojik özelliklerinin katkı ihtiyacına ve mekanik özelliklerine etkisini belirlemek için, iki farklı kökenden (kireçtaşı tozu ve kuvars) mikro agreganın farklı inceliklerde öğütülmüştür. Hazırlanan mikro agregaların tane boyutu, tane şekli ve yüzey morfolojisi detaylı şekilde belirlenmiştir. Ardından söz konusu malzemelerle hazırlanan mikro betonların, sabit karışım suyu ile aynı kıvam değerini elde edebilmek için gerekli akışkanlaştırıcı katkı dozajı ihtiyaçları belirlenmiştir. Aynı zamanda hazırlanan mikro beton örneklerinin mekanik özellikleri (eğilme ve basınç dayanımları) farklı yaşlarda saptanmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirilerek uygun mikro agreganın seçimine yönelik öneriler ortaya konulmuştur. Bir sonraki aşamada ise işlenebilirlik açısından daha avantajlı olan ve bünyesine lif kabul edebilen kendiliğinden yerleşen mikro beton incelemeleri üzerinde çalışılmıştır.

3.1.1 Kullanılan Malzemeler

Bu bölümde hazırlanan tüm mikro beton karışımlarında bağlayıcı madde olarak, Çimentoş çimento fabrikasından temin edilen CEM I 42.5R tipi normal Portland çimentosu ve Yapkim Yapı Kimya Sanayi A.Ş.'den temin edilen ithal silis dumanı kullanılmıştır. Mikro betonların yayılma çaplarını eşitlemek için İnnovatek firmasından temin edilen; özgül ağırlığı 1,18, pH değeri 6,5 ve katı madde oranı %35,7 olan polikarboksilat bazlı akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcı katkının klor içeriği %0,015'dir. Söz konusu katkı, TS EN 934-2 standardına göre yüksek oranda su azaltıcı / süperakışkanlaştırıcı sınıfına girmektedir. Mikro agrega olarak üç farklı incelikte kireçtaşı ve kuvars tozu öğütülerek hazırlanmıştır. Kullanılan malzemelerin deneylerle belirlenen ve üretici firmalardan temin edilen fiziksel, kimyasal özellikleri Tablo 3.1 ve 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri.

Fiziksel özellik	Portland çimentosu	Silis dumanı	Kuvars tozu			Kireçtaşı tozu		
			K _{ince}	K _{orta}	K _{kaba}	L _{ince}	L _{orta}	L _{kaba}
Özgül ağırlık	3,15	2,70	2,60	2,58	2,55	2,58	2,57	2,55
Blaine değeri (m ² /kg)	335	-	378	294	224	565	487	356
İncelik indeksi* (μm ² /μm ³)	-	-	61,33	21,08	12,16	62,80	28,75	18,27

* İncelik indeksi 3.1.2 Bölümünde açıklanmıştır.

Tablo 3.2 Kullanılan malzemelerin özellikleri.

Kimyasal kompozisyon (%)	CEM I 42,5R	Silis dumanı	Kireçtaşı tozu
SiO ₂	20,40	89,30	0,55
Al ₂ O ₃	4,82	3,75	0,17
Fe ₂ O ₃	2,95	0,90	0,15
CaO	63,86	-	57,6
MgO	1,52	2,10	0,60
SO ₃	2,05	0,35	-
Na ₂ O	0,32	0,36	-
K ₂ O	0,77	1,17	-
Kızdırma kaybı	3,70	-	40,2
Çözünmeyen kalıntı	0,91	Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri	
Serbest CaO	1,18	Hacim sabitliği (mm)	0,5
C ₃ S	62,49	Vicat kıvam suyu (%)	27
C ₂ S	11,34	Priz başlangıcı (dakika)	145
C ₃ A	7,78	Priz bitişi (dakika)	280
C ₄ AF	8,98	28g basınç dayanımı (MPa)	49,3

3.1.2 Mikro Agregaların Hazırlanması ve Tane Boyut Dağılımları

Mikro agregaların hazırlanmasında başlangıç tane boyutu 0,2 mm olan silis kumu ve 0,5 mm elekten elenmiş kireçtaşı tozu kullanılmıştır. Öğütme işlemi iç çapı 305 mm ve tambur uzunluğu 305 mm olan, 20 kg bilye kapasiteli laboratuvar tipi değirmende gerçekleştirilmiştir. Değirmen tamburu dakikada 70 devir hızla dönmekte olup, üç farklı inceliğin elde edilmesi için malzemeler sırasıyla 60, 100 ve 180 dakika öğütülmüştür. Öğütme sonucunda elde edilen Blaine değerleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Mikro agregaların parçacık boyut dağılımları Lazer Difraksiyon Dağılımı (LDS) Yöntemi ile Malvern Mastersizer cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Tane boyut dağılımları Şekil 3.1’de görülmektedir. Farklı mikro agregaların tane boyut dağılımlarının karşılaştırılmasında, bu tez kapsamında geliştirilen “İncelik İndeksi ($\bar{I}\bar{I}$)” kavramı kullanılmıştır. İncelik indeksi, parçacık boyut analizi sonuçları kullanılarak belirlenmiştir. Analizde tanımlanan her tane boyutu için elek çapları sırasıyla 300, 250, 200, 150, 120, 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10 ve 5 μm ’dir. Her çap için yüzey alanının hacme oranı, o tane boyutundaki malzeme hacminin toplam hacme oranı ile çarpılır. Tüm çarpımların toplamı, incelik indeksini vermektedir. İncelik indeksi arttıkça tane boyut dağılımının incelendiği söylenebilir.

$$\bar{I}\bar{I} (\mu\text{m}^2 / \mu\text{m}^3) = \sum_{i=5}^{300} \frac{A_i}{V_i} p_i \quad (3.1)$$

burada;

i : tane boyutu

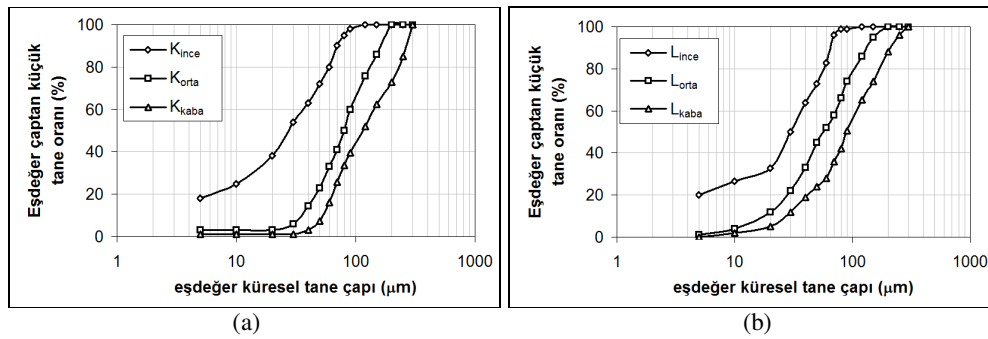
A_i : i boyutlu tanenin yüzey alanı

V_i : i boyutlu tanenin hacmi

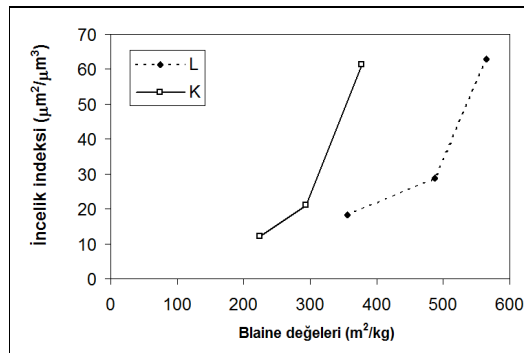
p_i : i boyutlu tane hacminin toplam hacme oranını göstermektedir.

Her mikro agregası için incelik indeksi değeri ayrı ayrı hesaplanmış olup, sonuçlar Tablo 3.1’de verilmiştir. Bu tabloda verilen incelik indeksi değerleri ile Blaine değerleri kireçtaşı ve kuvars kökenli mikro agregalar için ayrı ayrı gruplandırılmış ve

Şekil 3.2’deki grafik elde edilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi, aynı incelik indeksine sahip kuvars kökenli mikro agregaların Blaine değerleri, kalker kökenli mikro agregalara kıyasla çok daha düşük bulunmuştur. Blaine değerlerinin ölçümünde, ölçüm hücresi içine yerleştirilen mikro agregaların arasından geçen havanın hızı ölçülmektedir. Havanın taneler arasından geçiş hızını tane boyutunun yanı sıra, tane şekli, tane yüzeyi pürüzlülüğü ve tanelerin sıkışabilirliği de etkilediği için, mikro agregalar arasında belirgin farklılıklar söz konusudur. Kuvars kökenli mikro agregaların bir sonraki bölümde açıklanacak olan incelemelerden, göreceli olarak pürüzsüz bir yüzeyi olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle Blaine hücresinde hava taneler arasından hızla geçmekte ve düşük Blaine değerleri elde edilmektedir. Kireçtaşı kökenli mikro agregalarda ise, belirgin yüzey pürüzlülüğü ve topaklaşma eğiliminin getirdiği lokal sıkışmalar (bir sonraki bölümde açıklanacaktır), Blaine değerlerini arttırmaktadır.



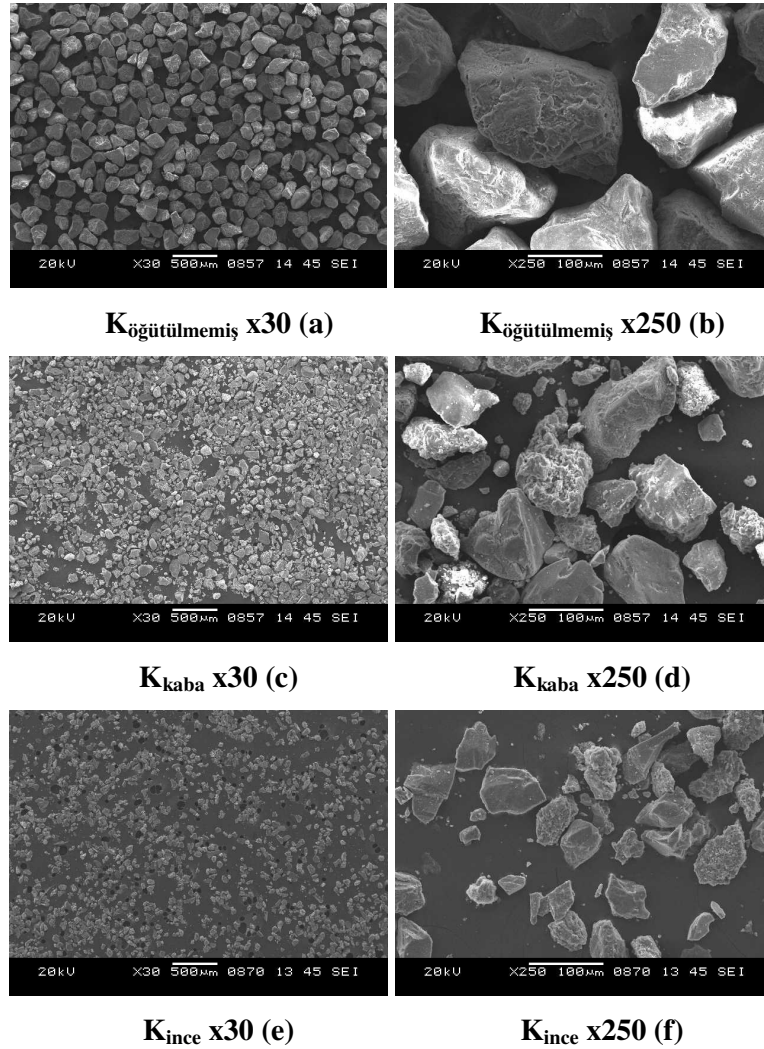
Şekil 3.1 Kullanılan mikro agregaların tane boyut dağılımları, a) Kuvars mikro agregası (K), b) Kireçtaşı mikro agregası (L).



Şekil 3.2 Mikro agregaların Blaine değerleri ile incelik indeksleri arasındaki ilişki.

3.1.3 Mikro Agregaların Tane Şekli ve Yüzey Morfolojileri

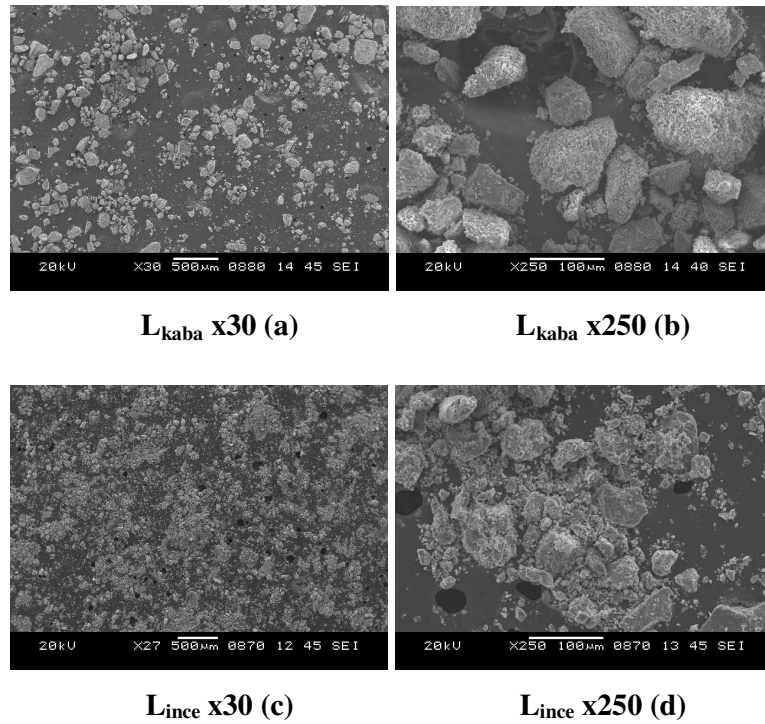
Mikro agregaların tane boyutunun yanı sıra, tane şekli ve yüzey pürüzlülüğü özelliklerini karşılaştırmak amacıyla, taramalı elektron mikroskobu ile çekilen fotoğraflardan yararlanılmıştır. Kaba ve ince tane boyut dağılımlı kuvars ve kireçtaşı mikro agregaları karbon bant üzerine döküldükten sonra 30 kat, 250 kat büyütmede yüzey görüntüleri alınmıştır (Şekil 3.3 ve 3.4).



Şekil 3.3 Kuvars kökenli mikro agregaların SEM fotoğrafları.

Kuvars mikro agregasının boyut dağılımı analizinde kullanılmayan en kaba formu da aynı şekilde sunulmuştur (hiç öğütülmemiş). Şekil 3.3 ve 3.4'den görüleceği üzere, yaklaşık benzer boyutlardaki kuvars ve kireçtaşı mikro agregaları

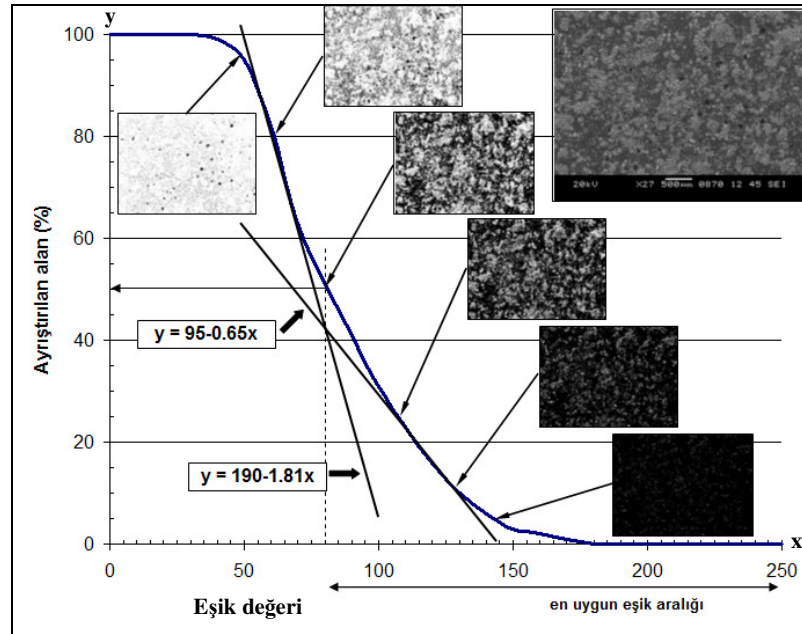
karşılaştırıldığında, tane şekli ve yüzey morfolojisi açısından bu taneler arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. Özellikle düşük büyütmelerde kireçtaşı mikro agregalarının, kuvars kökenli mikro agregalara kıyasla topaklanmaya daha eğilimli olduğu, öğütme ile bu etkinin daha da belirginleştiği gözlenmiştir. Diğer taraftan kuvars taneleri birbirinden ayrık durmaya daha eğilimlidir.



Şekil 3.4 Kireçtaşı kökenli mikro agregaların SEM fotoğrafları.

Mikro agregaların tane şekli, köşelilik ve yüzey morfolojisi özelliklerini sayısal olarak tanımlayabilmek amacıyla, SEM fotoğrafları “Lucia” adlı görüntü işleme programı kullanılarak analiz edilmiştir. Bu amaçla iki aşamalı ampirik bir yöntem izlenmiştir. İlk aşamada, görüntüdeki mikro agregaların karbon banttaki yüzey alanına oranı tespit edilmiştir. İkinci aşamada ise tane şekli, köşelilik ve yüzey pürüzlülüğünü yüzeysel alan oranı olarak ifade edebilmek için çeşitli analiz komutları kullanılmıştır. Farklı büyütmelerde çekilen SEM fotoğrafları için bu komutlardan en uygun olanı seçilerek yüzeysel mikro agrega yoğunluğuna bölünmüştür. Böylece düşük büyütmeli SEM görüntüleri için spesifik tane şekli ve köşelilik oranı, yüksek büyütmeli SEM görüntüleri için yüzey pürüzlülük oranları belirlenmiştir.

İlk aşamada görüntüdeki mikro agregaların yüzey alanına oranlarının tespiti için Wong, Head ve Buenfeld (2006) tarafından önerilen metod modifiye edilerek kullanılmıştır. Wong ve diğerlerinin (2006) çimento harcındaki boşluk oranını belirlemede kullandıkları bu yöntem, temel olarak görüntüdeki her pikselin rengi kullanılarak yapılan bir tür ayıklama prensibine dayanmaktadır. SEM görüntülerini oluşturan pikseller 0 (siyah)'dan 256 (beyaz)'ya kadar farklı gri tonlarda olup, bilgisayar programı ile bu tonlar ayırt edilebilmektedir. Örneğin, 0-50 arası koyu griyi temsil ederken, 200-255 arası çok açık, beyaza yakın griyi temsil etmektedir. Renk tonları arasında, (özellikle keskin geçişlerin olduğu mikro agrega – taban arası) bir geçiş bölgesi bulunmaktadır. Geçiş tanımlayan en uygun gri tona “eşik” (threshold) değeri denilmektedir. Eşik değerin bulunmasında Şekil 3.5’de verilen tarama yapılarak mikro agrega tanelerinin yüzeydeki alansal oranı tespit edilmektedir. Tüm görüntüler için, ayrıştırma grafiği çizilip uygun eşik değeri bulunmuş ve tüm görüntülerdeki mikro agrega tanelerinin alansal oranı belirlenmiştir.



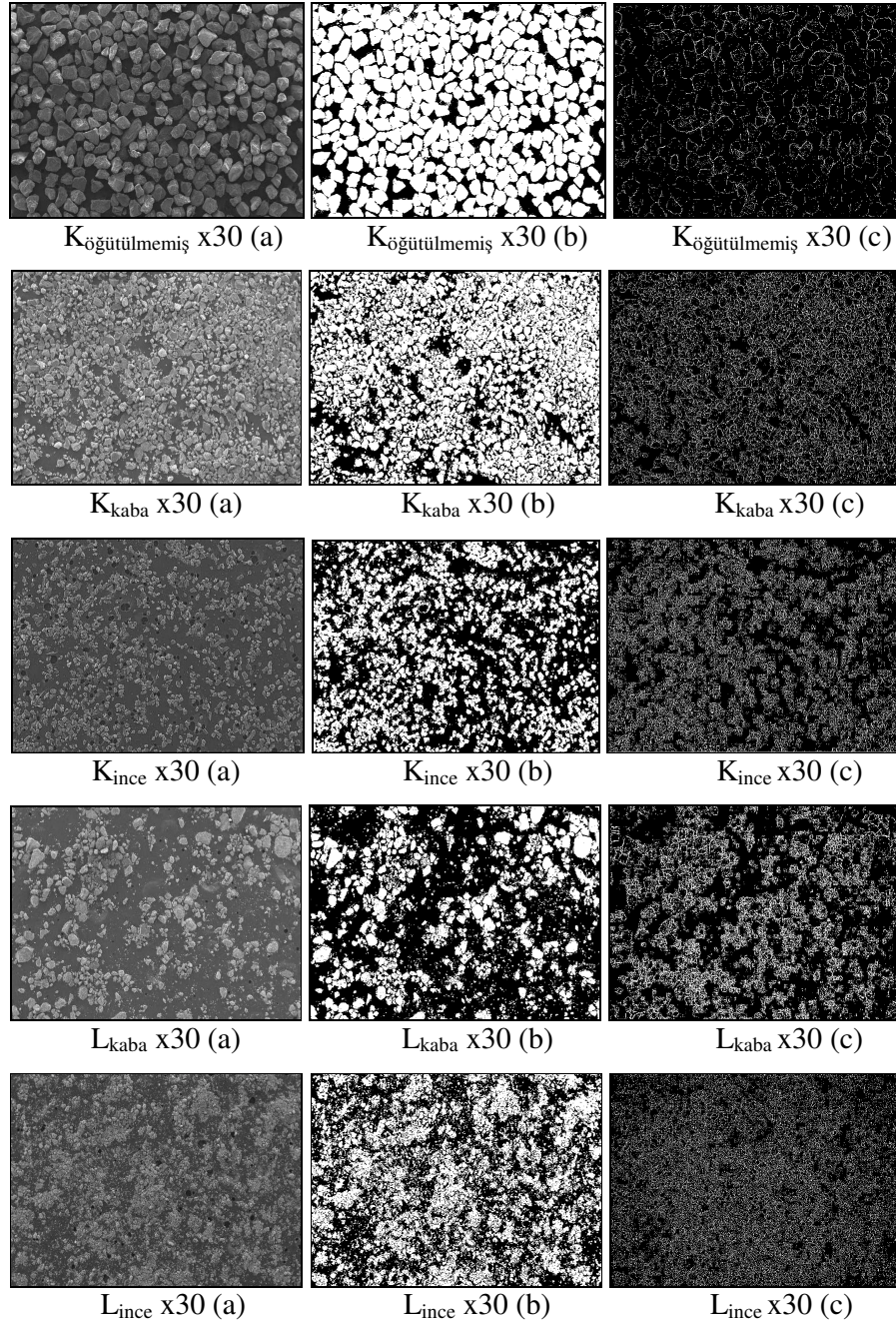
Şekil 3.5 En uygun eşik “threshold” değerinin tespitine yönelik olarak SEM görüntüsünün 2 boyutlu yüzey alanı taraması. (L_{ince} örneğinin düşük büyütmedeki (x27 kat), gri ton alt eşik değeri ve alan taraması: sağdan sola 145-%5,1 129-%10,3 108-%26,1 80-%50 64-%80 52-%96).

Mikro agregaların SEM görüntüleri ve bir önceki paragrafta söz edilen yöntemle belirlenmiş yüzeysel alan oranlarının hesaplandığı görüntüler Şekil 3.6 ve 3.7'nin b sütunlarında sunulmuştur.

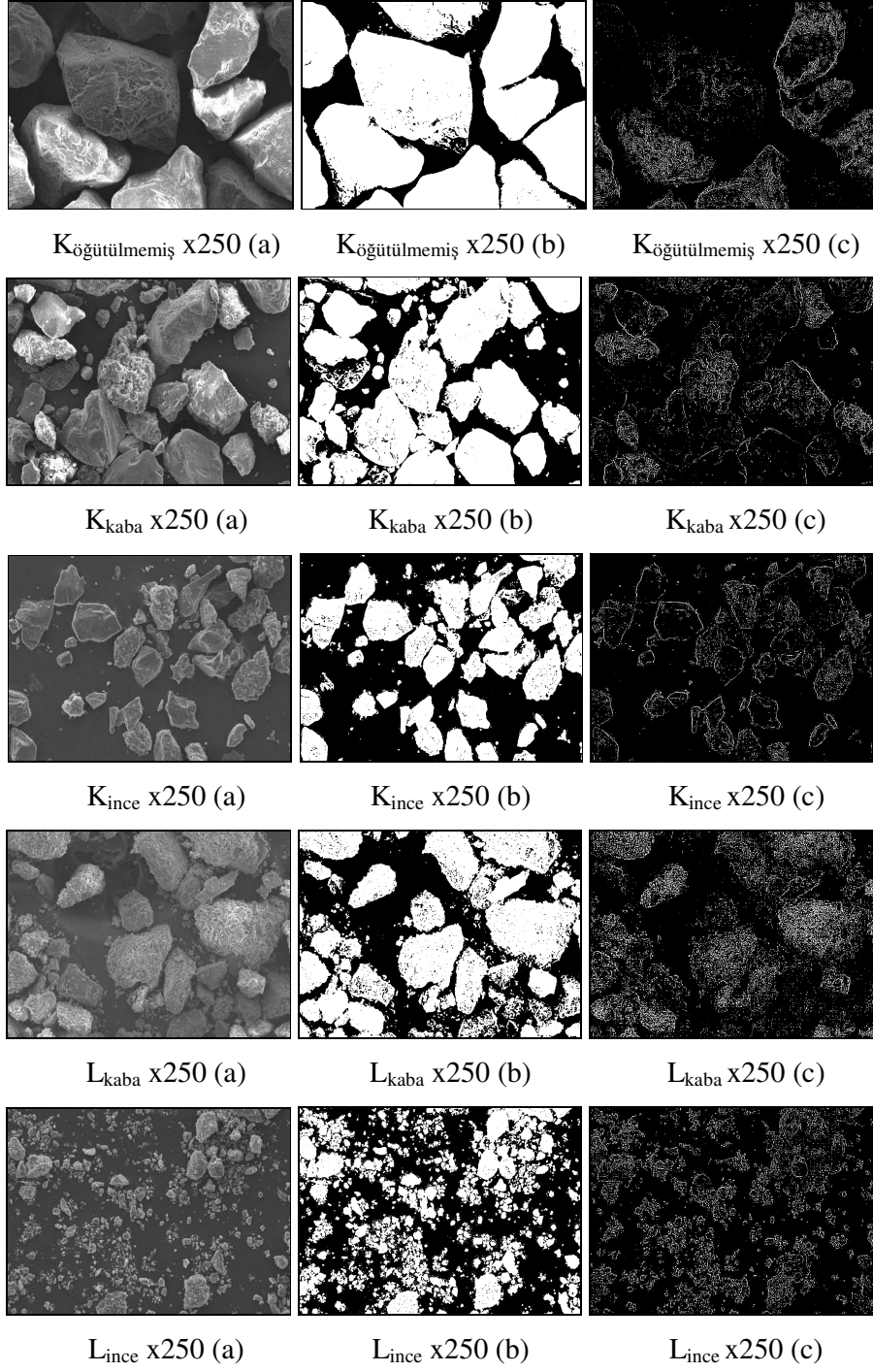
İkinci aşamada hem yüksek hem de düşük büyütme görüntüleri için mikro agregaların tane şekli ve yüzey morfolojisini tanımlamaya yönelik olarak PSP programının filtreleme komutları araştırılmıştır. Pek çok filtreleme ve pürüzlülük ölçme komutu incelenmiştir (Achour, Zenati ve Laga, 2001, Chen, Wu, Tokaman ve Hughes, 2002). Filtreleme komutları arasından “Trace Contour - TC” komutunun kullanılmasına karar verilmiştir. Bu komut pikseller arasındaki ani ton değişikliklerini (tane sınırlarını ve yüzeydeki girinti çıkıntıları) yakalamakta ve bu değişikliklerin alansal oranını belirlemede kullanılmaktadır. TC komutu ile elde edilen görüntü analiz sonuçları Şekil 3.6 ve 3.7'nin c sütununda verilmiştir.

Şekil 3.7'nin c sütununda görüleceği üzere, yüksek büyütme görüntülerde TC komutu ile daha çok tane yüzey özellikleri ön plana çıkartılırken, Şekil 3.6'nın c sütununda verilen düşük büyütme görüntülerde bu komut ile tane şekli ve köşeliliği daha fazla ön plana çıkmaktadır. Bu nedenle farklı büyütme oranlarından elde edilen veriler ile değişik özelliklerin karakterize edilebileceği söylenebilir. TC komutu ile elde edilen tane köşeliliği ve yüzey pürüzlülüğü alansal oranları, SEM fotoğrafındaki mikro agregaların alansal oranına bölünerek spesifik (bağıl) TC değerleri elde edilmiştir. Şekil 3.8 a ve b'de hesaplanan spesifik tane şekli ve yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir. Yaklaşık olarak, benzer tane boyut dağılımına sahip kuvars ve kireçtaşı mikro agregalarının karşılaştırıldığı Şekil 3.8-a'da, 30 kat büyütme SEM görüntülerinin spesifik tane şekli değerleri görülmektedir. Kuvars taneleri kireçtaşı mikro agregalarına göre daha az köşeli bir tane şekline sahiptir. Ögütme etkisi ile kuvars tanelerinin köşeliliğinin kireçtaşı tanelerine göre daha fazla arttığı, ancak kireçtaşına hiçbir zaman yetişemediği görülmektedir. Şekil 3.8-b'de ise, 250 kat büyütme ile çekilen SEM görüntülerinin spesifik yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir. Bu durumda komut, tane yüzey görüntü ayrıntıları daha çok ortaya çıktığı için, yüzey pürüzlülüğü ile ilişkilendirilebilir. Kuvars taneleri kireçtaşı mikro agregalarına göre daha az yüzeysel pürüzlülüğe sahiptir. Ögütme ile kireçtaşı mikro

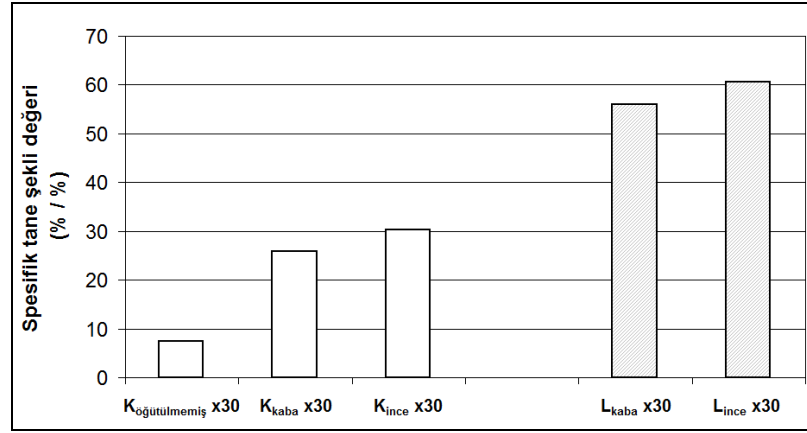
agregalarının yüzey pürüzlülüğü azalmakta, buna karşın kuvars mikro agregalarının yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Ancak, köşeliliğe benzer şekilde, kuvars mikro agregalarının yüzey pürüzlülüğü kireçtaşı agregalarına yaklaşmamaktadır.



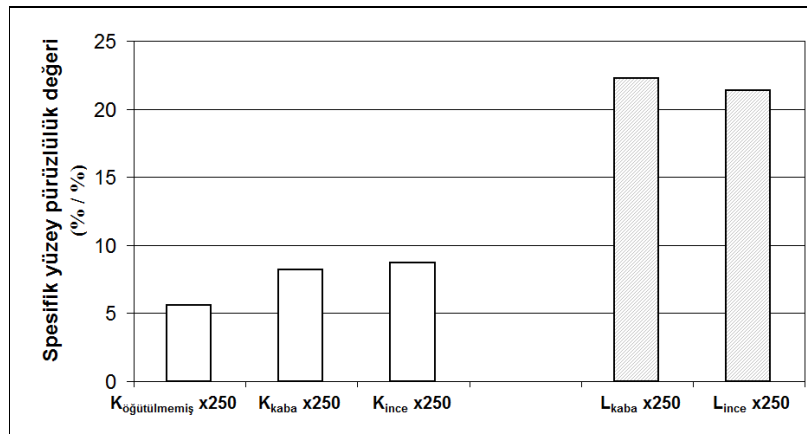
Şekil 3.6 (a) 30 kat büyütmede çekilen SEM fotoğrafları, (b) mikro-agrega tanelerinin en uygun eşik değeri tespit edilerek belirlenmiş yüzey alanları, (c) tane şekli ve köşelilik oranının tespiti için “Trace contour- TC” komutu kullanılarak elde edilmiş görüntü.



Şekil 3.7 (a) 250 kat büyütmede çekilen SEM fotoğrafları, (b) mikro-agrega tanelerinin en uygun eşik değeri tespit edilerek belirlenmiş yüzey alanları, (c) tane şekli ve köşelilik oranının tespiti için “Trace contour- TC” komutu kullanılarak elde edilmiş görüntü.



(a)



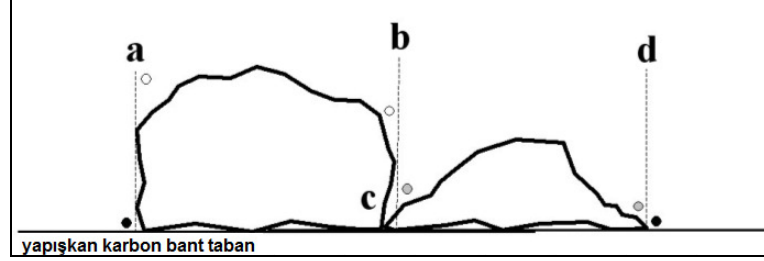
(b)

Şekil 3.8 Farklı büyütmelelerde (30 kat) ile çekilen SEM fotoğraflarında TC analizi ile belirlenmiş spesifik tane şekli ve yüzey pürüzlülük değerleri.

Tüm görüntü işleme yöntemlerinde olduğu gibi bu çalışmada kullanılan yöntemde de kesin sonuca ulaşmak mümkün olamamaktadır. Gerek örnek hazırlama, gerekse fotoğraf çekimi ve işleme aşamalarında, gerçeğe en yakın sonuca ulaşmak için dikkat edilmesi gereken kurallara uyulmaktadır. Ancak yöntemin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar şu şekilde sıralanabilir:

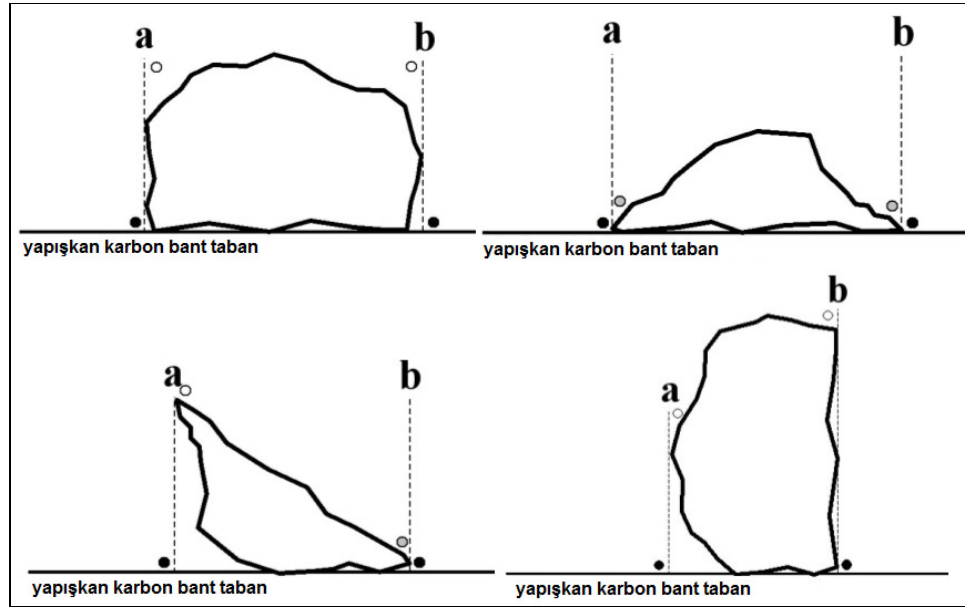
- Taneler mikronize boyutta olduğu için, karbon bantın yüzeyine tek tabaka halinde ve düzenli olarak yapıştırılması oldukça zordur. Bu nedenle üstten çekilen fotoğrafta bazı taneler diğer tanelerin altında ya da arasında kalabilmektedir.

- Taneler birbiri ile temas ettiği için geometrik şekilleri, duruşları birbirini gölgeleyebilmekte ve tanenin tüm çevresi her zaman ölçülememektedir. Tanelerin duruşlarının rastgele değişmesi deney sonuçlarının değişkenliğini de arttırmaktadır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 Tanelerin birbiri ile teması nedeniyle gölgelenen kenarlar.

- Mikro agreganın karbon bant tabanına göre yükseltisi kontrast farkı yarattığı için iri tanelerde tane çevresi daha kalın olarak algılanabilmektedir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 Mikro agreganın tabana göre farklı yükseklikte olmasından kaynaklanan kenar kalınlık farklılığı.

TC yöntemi, tane şekli ve yüzey pürüzlülüğü açısından çok farklı olan mikro agregaların ayırt edilmesinde fayda sağlarken, birbirine yakın tane şekli ve yüzey

pürüzlülüğü olan mikro agregalarda yukarıda sözü edilen dezavantajlar nedeniyle karşılaştırma yapmayı güçleştirmektedir. Alternatif bir yöntem olarak parlak kesit incelemesi yoluna gidilebilir. Mikro agregalar polyester reçine içine homojen şekilde karıştırılıp kalıplandıktan sonra parlak kesit hazırlanarak tane şekli özelliklerini daha hassas bir şekilde incelemek mümkün olabilir. Ancak yüzey pürüzlülüğünün hassas bir şekilde bulunması ise tane yüzeyinin 3 boyutlu tarama yöntemleri ile incelenmesi ile mümkündür (Erdoğan ve diğer., 2006, Topal, 2008).

3.1.4 Mikro Beton Karışımlarının Hazırlanması

Hazırlanan mikro betonların karışım oranları Tablo 3.3’de görülmektedir. Karışımlar aynı yayılma çapı hedeflenerek hazırlanmıştır. Kıvam deneyi ASTM C187 standardına göre yapılmış olup, yayılma çapları 125-135 mm arasında tutulmuştur. Bu amaçla katkı dozajı değiştirilmiştir. Aynı su/çimento (0,46) oranında her karışımda farklı bir mikro agrega kullanılmıştır. Tüm örnekler sarsma tablasında eşit süreli dış vibrasyon uygulaması ile yerleştirilmiştir. Her karışımdan 40*40*160 mm boyutlarında 9 adet prizmatik örnek hazırlanmıştır. Örnekler standart kür uygulandıktan sonra 1, 7 ve 28 günlük eğilme ve eğilme sonrası basınç deneyine tabi tutulmuştur.

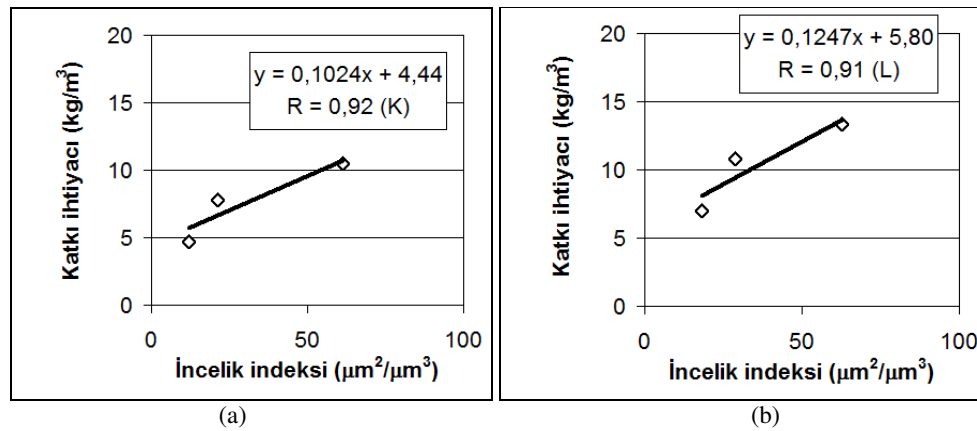
Tablo 3.3 Mikro betonların karışım oranları

Malzemeler (kg/m ³)	MB-K _i	MB-K _o	MB-K _k	MB-L _i	MB-L _o	MB-L _k
CEM I 42,5R	658	652	651	652	652	652
Silis dumanı	132	130	130	130	131	130
Su	301	298	298	298	300	298
Mikro agrega 1 (ince - i)	1127	-	-	1117	-	-
Mikro agrega 2 (orta - o)	-	1117	-	-	1125	-
Mikro agrega 3 (kaba - k)	-	-	1116	-	-	1118
Akışkanlaştırıcı katkı	10,5	7,8	4,7	13,3	10,8	7,0

3.1.5 Mikro Betonların Katkı İhtiyacı ve Mekanik Özellikleri

Şekil 3.11’de bu bölümde incelenen mikro betonların sabit bir yayılma çapına ulaşmak için, gerekli akışkanlaştırıcı katkı miktarlarının incelik indeksine göre

değişimi verilmiştir. Hem kuvars hem de kireçtaşı ile üretilen mikro betonlarda hedeflenen kıvama ulaşmak için gerekli katkı ihtiyacı ile incelik indeksi arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır, ancak kireçtaşı mikro agregası kullanılan mikro betonların katkı ihtiyacının sabit bir incelik indeksi değeri için bir miktar daha fazla olduğu görülmektedir. Burada mikro agregaların yüzey yapısının da önemi ortaya çıkmaktadır. Parçacık boyut analizi cihazları, parçacık tane boyutunu, mikro taneleri küresele yakın forma dönüştürerek hesaplamakta, küresellikten uzaklaştıkça lazer parçacık boyut analizi cihazlarının yaptığı ölçümlerde hata payı artmaktadır (Hackley ve Ferraris, 2001). Ayrıca mikro pürüzlülüğü fazla olan tanelerin yaratacağı ilave katkı ihtiyacı, tane boyut dağılımından elde edilen incelik indeksi değerinden fark edilememektedir. Bu bağlamda incelik indeksi verilerinin yanında, tane pürüzlülüğü çok farklı olan mikro agregalar için yüzey özellikleri de katkı ihtiyacının belirlenmesinde dikkate alınmalıdır.



Şekil 3.11 Mikro betonda hedeflenen kıvam için incelik indeksi ile katkı ihtiyacı arasındaki ilişki, a) Kuvars (K), b) Kireçtaşı (L) mikro agregalı karışımlar.

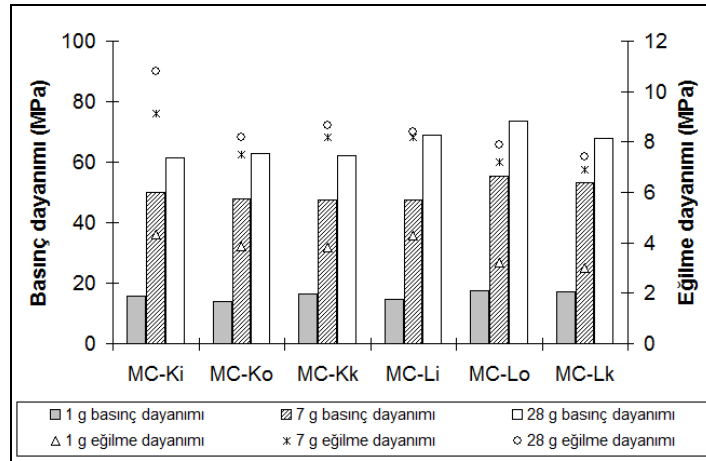
Farklı minerolojik kökenden olan ince malzemelerin su ihtiyacının incelendiği çalışmalarda, tane inceliğinin yanında, tane şekli ve yüzey yapısının da su ihtiyacını etkilediği rapor edilmiştir (Gallias, Kara-Ali ve Bigas, 2000, Bigas ve Gallias, 2003, Westerholm, Lagerblad ve Forssberg, 2007). Artan su ihtiyacı, ilave su veya akışkanlaştırıcı katkı ile dengelenmediği takdirde, bu malzemelerle hazırlanan çimento harçlarının iyi sıkışması mümkün olmayıp, boşluklu bir yapı elde edilecektir. Özellikle kireçtaşı tozu gibi yüzey pürüzlülüğü fazla, minerolojik olarak elektrostatik yüklenmeye eğilimli ve nem tutucu mikro agregaların topaklaşma riski

oldukça yüksektir. Bu sakıncalı durum ancak etkili akışkanlaştırıcıların yüksek oranda kullanımı ile azaltılabilmektedir. Diğer taraftan ince kuvars tozu gibi, nispeten pürüzsüz yüzeyli tozların kullanımı halinde, taze betonda kaydırıcı işlev görebileceği belirlenmiştir (Quiroga ve Fowler, 2004, Cortes, Kim, Palomino, Santamarina, 2008).

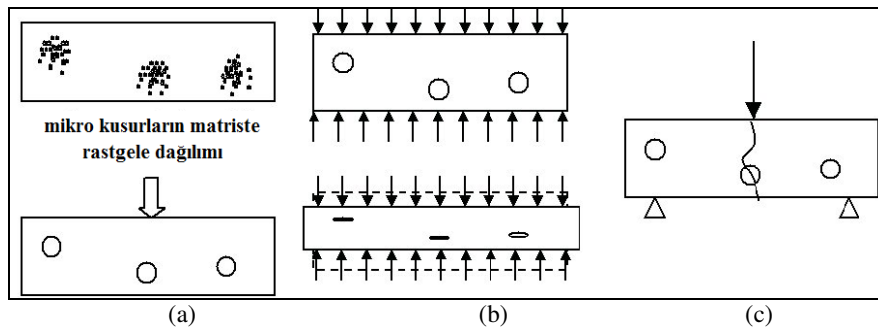
Mikro betonların basınç ve eğilme dayanımları Şekil 3.12’de toplu halde verilmiştir. Kireçtaşı mikro agregaları kullanılan karışımlarda (L), incelik arttıkça tüm yaşlarda basınç ve eğilme dayanımları az da olsa bir miktar artmaktadır. Tane boyutu azaltıldıkça görülen kıvam kaybının, akışkanlaştırıcı katkı dozajını artırarak ortadan kaldırılması, mekanik özellikleri iki yönden olumlu etkilemiştir. İlk olumlu etki karışımların sıkışabilirliklerinin artmış olmasıdır. Ayrıca akışkanlaştırıcı katkının yarattığı elektrostatik ve sterik itki kuvvetleri ile karışım suyunun çimento ve mikro agregataneleri arasında daha homojen dağılması ve çimento tanelerinin hidrate olma hızının artması da dayanım gelişimini olumlu etkilemiştir. Kuvars mikro agregaları kullanılarak hazırlanan karışımlarda ise, incelik artışı ile basınç dayanımı aynı derecede artmamış, hatta sabit kalmıştır. Eğilme dayanımında ise, bir dalgalanma söz konusu olup, en ince kuvars mikro agregasının kullanıldığı karışımda en yüksek eğilme dayanımı elde edilmiştir. Kuvars agregalı mikro betonlarda basınç dayanımının kireçtaşı agregalı örneklerle kıyasla düşük kalmasının nedeni aynı yayılma için daha az katkı kullanılması olabilir, ancak kesin bir açıklama yapılamamaktadır.

Kireçtaşı ve kuvars mikro agregalı örneklerin eğilme ve basınç dayanımları arasında, en çok öğütülmüş seriler için bir karşılaştırma yapılacak olursa, basınç dayanımının kireçtaşı mikro agregalı örneklerde, eğilme dayanımının ise kuvars mikro agregalı örneklerde daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 3.12). Basınç gerilmesi durumunda çok küçük boyutlu mikro kusurlar ezilme etkisi ile kapanırken, eğilme etkisinde bu tür mikro kusurlar çekme dayanımının yetersizliği nedeniyle eğilme dayanımını doğrudan etkiler hale gelmektedir. Kireçtaşı mikro agregalarının pürüzlü ve köşeli yapısı, basınç gerilmesi altında kapanan çok küçük boyutlu mikro kusurların çoğalmasını sağlamış olabilir. Bu olası açıklamaların şematize edilmiş hali

Şekil 3.13’de gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlar, mikro betonun eğilme dayanımının mevcut hali ile mikro kusurlardan önemli derecede etkilendiğini ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle, mikro betonun içyapı kusurlarını azaltmaya yönelik olarak çok akıcı kıvamda (kendiliğinden yerleşen) üretilmesi daha avantajlı olacaktır. Ayrıca eğilme dayanımını etkileyen kusurların etkisini azaltmaya yönelik ikinci bir alternatif olan lif katkısı kullanımına da ilerleyen aşamalarda ağırlık verilecektir.



Şekil 3.12 Mikro betonların basınç ve eğilme dayanımlarının gelişimi.



Şekil 3.13 Kireçtaşı mikro agregası kullanılarak hazırlanan mikro betonların eğilme ve basınç dayanımlarındaki farklılığın kaynağı. a) kusur kümelenmesi, b) basınç gerilmesi altında kusurların kapanması, c) eğilme etkisi altında kusurların etkisi.

3.1.6 Sonuçlar ve Değerlendirme

Kullanılan mikro agreganın tipinin mikro betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkilerinin incelendiği bu bölümde elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

1. Mikro agregaların tane boyutu, tane şekli ve yüzey morfolojisi karakterizasyonu farklı yöntemler bir arada kullanılarak yapılmalıdır. Tek bir yöntemden elde edilen sonuçlarla kesin yargılara ulaşmak mümkün olmamaktadır. Her yöntemin kendine özgü avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

2. Farklı mikro agregaların tane boyut dağılımının karşılaştırılmasında tez kapsamında geliştirilen “*incelik indeksi (II)*” kavramı kullanılmıştır. İncelik indeksi, parçacık boyut analizi sonuçları kullanılarak belirlenmiştir. Blaine değerlerinin, kuvars kökenli mikro agregalarda kireçtaşı kökenli mikro agregalara kıyasla çok daha düşük çıkması, kuvars tanelerinin daha kaba olduğu sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Blaine ölçümünde taneler arasından geçen havanın hızı ölçülmektedir. Ölçülen bu hız tane boyutunun yanında tane şekli ve yüzey özellikleri ile de yakından ilişkilidir. Kuvars mikro agregalarının pürüzsüz tane şekli havanın taneler arasından geçişini kolaylaştırmaktadır. Ancak tane boyut dağılımı ölçümlerinden elde edilen incelik indeksine göre kuvars ve kireçtaşı mikro agregalarının tane boyutu farklılıklarının daha az olduğu belirlenmiştir.

3. Görüntü işleme programları ile farklı büyütmelede çekilen mikro agrega fotoğrafları analiz edilmiştir. Analiz sonuçları kullanılarak mikro agregaların tane şekli ve yüzey özellikleri birbiri ile karşılaştırılabilmektedir. Bu yöntem çok farklı yüzey özelliklerine sahip mikro agregaların karşılaştırılmasında yararlı olmuştur. Ancak bazı dezavantajları nedeniyle, yüzey yapısı benzer özellikteki mikro agregaların incelenmesinde daha hassas yöntemlerle 3 boyutlu analize ihtiyaç duyulabilir.

5. Kireçtaşı kökenli mikro agregaların, öğütülmesi durumunda, kuvars mikro agregalarına kıyasla topaklaşmaya daha eğilimli oldukları belirlenmiştir.

6. Mikro agrega türüne ve inceliğine bağlı olarak mikro betonun akışkanlaştırıcı katkı ihtiyacı değişiklik göstermektedir. Aynı yayılma çapına sahip mikro betonlar tasarlayabilmek için gereken katkı miktarı yalnızca mikro agreganın tane boyut dağılımına bağlı olmayıp, tane şekli ve yüzey özellikleri de katkı ihtiyacını

etkilemektedir. Bu çalışmada incelenen kireçtaşı mikro agregası katkı ihtiyacını, benzer tane boyut dağılımına sahip kuvars mikro agregasına göre daha fazla arttırmıştır. Mikro agregaların SEM incelemelerinde bu farkın morfolojik yapı ile bağlantısı ortaya konulmuştur.

7. Mikro betonun mekanik performansını farklı kökene sahip mikro agregalar değişik şekilde etkilemektedir. Basınç dayanımı açısından bakıldığında kireçtaşı mikro agregası olumlu sonuç verirken, eğilme dayanımı açısından kuvars mikro agregası ile daha yüksek değerler elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, mikro betonun eğilme dayanımının mevcut hali ile mikro kusurlardan önemli derecede etkilendiğini ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle mikro betonun içyapı kusurlarını azaltmaya yönelik olarak çok akıcı kıvamda (kendiliğinden yerleşen) üretilmesinin daha avantajlı olacağı belirlenmiştir. Ayrıca eğilme dayanımını etkileyen kusurların etkisini azaltmaya yönelik ikinci bir alternatif olan lif katkısı kullanımı da ilerleyen bölümlerde anlatılacaktır.

8. Mikro betonda en fazla sıkışabilirlik için en uygun tane boyut dağılımının belirlenmesi, klasik betondaki gibi ideal tane boyut dağılımı sınırları olmadığı için mümkün olamamıştır. Ayrıca mikro agregalarda, iri agregalardan farklı olarak; sadece boyut dağılımı ve tane şekli değil, yüzey elektrostatik yükleri ve nem tutma kapasiteleri gibi topaklaşma yaratıcı unsurlar en fazla sıkışabilirliği sağlamada etkili olmaktadır.

9. Genel bir değerlendirme yapılacak olursa, mikro agregaların öğütülerek daha da inceltilmesinin çok büyük bir avantaj sağlamadığı, ekonomik açıdan ek maliyet getireceği söylenebilir. Kireçtaşı tozu hem konkasör filtrasyon atığı olarak, hem de sanayinin farklı dallarında hammadde olarak kullanılmakta ve piyasadan kolaylıkla temin edilebilmektedir. Bu nedenle çalışmanın ilerleyen aşamalarında piyasadan hazır öğütülmüş halde kireçtaşı mikro agregası temin edilerek çoğunlukla tek bir mikro agregası ile çalışılmasına karar verilmiştir.

3.2 Kendiliğinden Yerleşen Mikro Beton Tasarımına Yönelik Ön Çalışmalar ve Tikotropi Kaynaklı Kaynaşma Problemi

Bir önceki bölümde incelenen mikro beton tasarımları kalıba yerleştirme aşamasında vibrasyon gerektirmekte ve mekanik özellikleri iç yapı kusurlarından belirgin şekilde etkilenmektedir. Mikro beton tasarımları akıcı hale getirilerek, sözü edilen içyapı kusurlarının azaltılması ve kolay yerleştirilebilir özellikte olması hedeflenmiştir. Bu kapsamda bir önceki bölümde incelenen karışımlara kıyasla karışım suyu ve akışkanlaştırıcı miktarları arttırılmış, çimento dozajı bir miktar azaltılmıştır. Tablo 3.4’de, hazırlanan karışımın bileşenleri verilmiştir. Ayrıca mikro agrega olarak piyasadan (Öztüre Kireççilik, öğütülmüş Muğla kalsiti) temin edilen hazır kireçtaşı tozu kullanılmış, herhangi bir öğütme yapılmamıştır. İlerleyen aşamalarda da bu mikro agrega kullanılmaya devam edilmiştir.

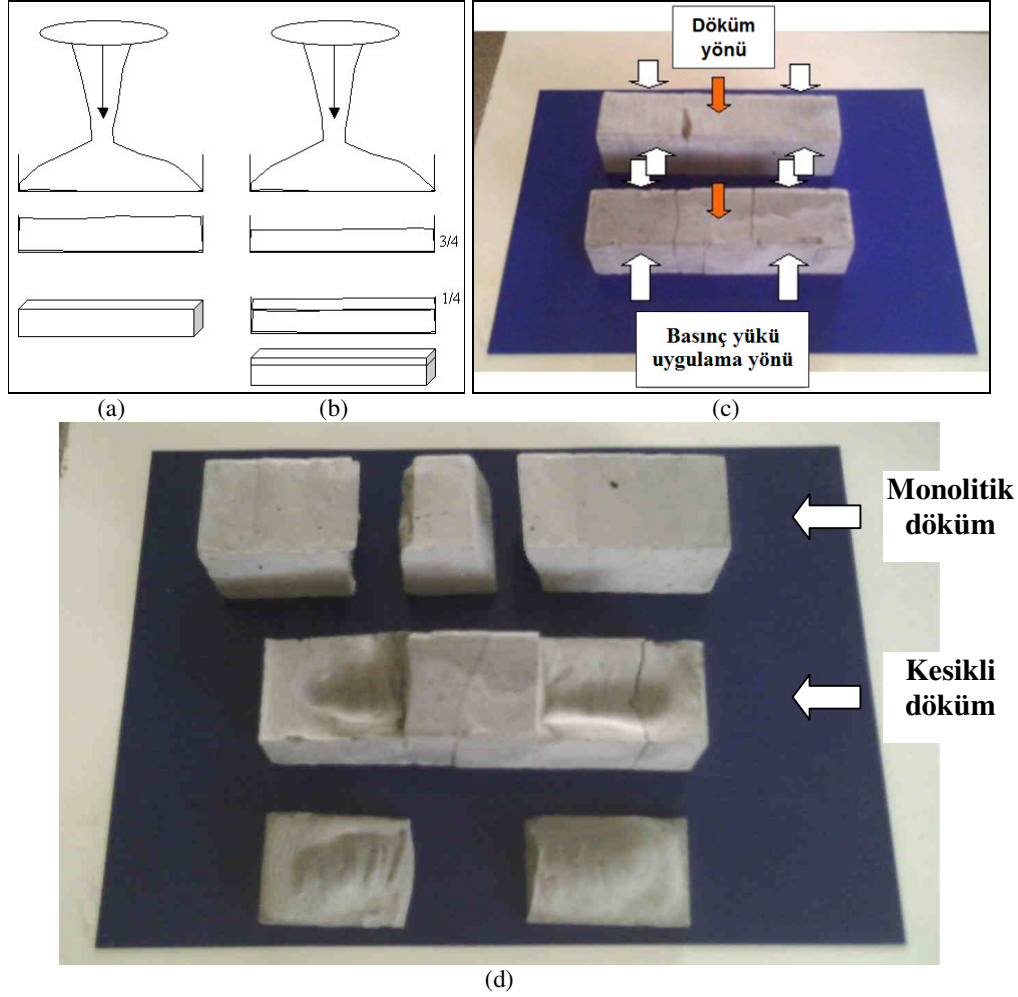
Tablo 3.4 Kendiliğinden yerleşen mikro beton karışımı

Malzemeler	Miktar (kg/m ³)
Çimento (CEM I 42,5R)	586
Silis dumanı	117
Uçucu kül	0
Kireçtaşı tozu	1010
Su	343
Akışkanlaştırıcı katkı	23
Toplam	2079

Taze mikro beton karışımının yayılma çapı, kesik koni formundaki bir kalıba doldurulduktan sonra kendiliğinden yayılmaya bırakılarak belirlenmiştir. Karışımın yayılma çapı 330 mm’dir. Eğilme ve basınç dayanımını belirlemek üzere karışım, 40*40*160 mm’lik kalıba iki farklı yöntemle doldurulmuştur. Buradaki amaç, uygulamada mikro beton karışımlarının sürekli (monolitik) veya kesikli dökülmesi halinde, tabakalar arasında bir kaynaşma problemi olup olmadığını belirlemektir. İlk yöntemde kendiliğinden yerleşen mikro beton kalıp içine boşaltılıp, tüm kalıp sürekli akış ile doldurulmuştur (Şekil 3.14a). İkinci yöntemde ise önce kalıbın ¾’lük kısmı doldurulmuş ve 5 dakika beklenmiştir (Şekil 3.14b). Bekleme sonrasında kalan kısım

doldurulmuştur. Uygulamada 5 dakikalık bir gecikme her zaman mümkün olabilir; pompa arıza yapabilir, transmikser gecikebilir. Hazırlanan örnekler kalıptan alındıktan sonra 28 gün suda bekletilmiştir. Bu süre sonunda örneklerle eğilme ve eğilme sonrası basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır (ASTM C 348 ve C 349). Eğilme dayanımlarında önemli bir farklılık olmayıp ortalama 8-9 MPa değerleri elde edilmiştir. Basınç dayanımı deneylerinde ise farklı döküm yöntemleri ile elde edilen sonuçlar değişkenlik göstermektedir. Döküm yönüne dik doğrultuda uygulanan basınç gerilmesi, örnekte herhangi bir süreksizlik varsa buradan yarılmaya şeklinde bir göçmeye neden olmaktadır (Şekil 3.14c). Monolitik olarak dökülen örnekte basınç dayanımı 53,6 MPa iken, kesikli olarak dökülen örneğin basınç dayanımı 46,5 MPa'da kalmıştır. Aynı zamanda kesikli dökülen örnekte ara verilen yüzeyin tamamen ortaya çıktığı, burada bir tür soğuk derz oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 3.14d). Monolitik olarak dökülen örnekte böyle bir durum söz konusu değildir.

Bu bölümde yapılan küçük çaplı incelemeden mikro beton karışımlarının kesikli dökümde kaynaşmama sorunu olabileceği belirlenmiştir. Mikro betonun başlangıç reolojik özelliklerine ve bu özelliklerin zamana bağlı değişim derecesine göre davranışı değişmektedir. Sözü edilen davranış değişikliği literatürde “*tiksotropi derecesi*” kavramı ile tanımlanmaktadır (Roussel, 2007, Mahaut ve diğer., 2008). Tiksotropi; hareketli halde akıcı iken, durgun halde katılaşma davranışı gösterme, olarak tanımlanabilir. Tiksotropi derecesi yüksek bir karışımda, hem eşik kayma gerilmesinin (EKG) hem de plastik viskozitenin (PV) yükselmesi söz konusudur. Örneğin, hamur hacmi geleneksel betona göre daha fazla olan kendiliğinden yerleşen betonda da bazı kohezif karışımlarda, yüksek “tiksotropi derecesi” kaynaklı kaynaşmama sorunları rapor edilmiştir (Roussel, 2007). Bünyesinde iri agrega bulunmayan mikro betonda bu durum daha belirgindir. Farklı mikro beton tasarımlarında “tiksotropi derecesi” değişkenlik göstereceğinden, düşük tiksotropi derecesine sahip tasarımlar tercih edilmelidir.



Şekil 3.14 Yüksek tiksotropiye sahip mikro beton kullanılarak hazırlanan örnekler, a) Monolitik döküm yöntemi, b) Kesikli döküm yöntemi, c) Döküm yönüne dik yönde uygulanan basınç gerilmesi, d) Üstteki örnek monolitik olarak dökülen yüksek tiksotropiye sahip mikro betonun basınç deneyi sonrası durumudur. Alttaki örnekte ise aynı karışımın kesikli dökülmesi durumunda taze halde oluşan ve basınç deneyi sonrası ortaya çıkan derz görülmektedir.

Betonun döküm sırasında kalıba yerleşmesi, donatılar arasından geçerek kalıbı doldurması için ideal viskoz sıvı olması (eşik kayma gerilmesi=0) gerekir. Çünkü ideal viskoz bir sıvı çok uzun süre beklenildiği takdirde, kalıbı tam olarak doldurur ve seviyelenir. Pratikte beton gibi iri agrega içeren süspansiyonların eşik kayma gerilmelerinin sıfır olması çok güçtür. Aynı zamanda viskoziteye bağlı olarak, düşük eşik kayma gerilmelerinde ayrışma riski gündeme gelebilir. Bu nedenle karışım mutlaka bir eşik kayma gerilmesine sahip olacaktır. Bu da yerleşmede zorluk

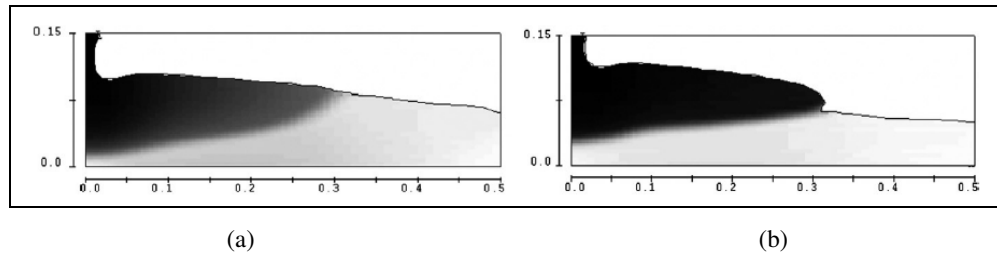
demektir. Kendi ağırlığının yarattığı kayma gerilmesi, karışımın eşik kayma gerilmesinin üzerinde olduğu sürece yerleşme devam edecek, altına düştüğünde ise hareket duracaktır. Eşik kayma gerilmesi ne kadar yüksekse yerleşme oranı o derece düşük olacaktır (Roussel, 2007).

Tiksotropi derecesi düşük bir KYB, ilk döküm anından bir süre sonra kalıpta tam olarak seviyelenirken, tiksotropi derecesi yüksek bir karışımda seviyelenme olmamaktadır. Bu durumda, tiksotropi derecesi yüksek taze betonun üzerine yapılacak eklemelerde kaynaşma sorunları ortaya çıkmaktadır (Roussel, 2007). Zira tiksotropi derecesi yüksek bir karışımda, ilk anda düşük olan plastik viskozite (PV) ve eşik kayma gerilmesi karıştırma durdurulunca yükselmektedir. Böylece hem akış hızı yavaşlamakta, hem de akmanın başlaması için gerekli enerji miktarı artmaktadır. Betonun kendi ağırlığı, bu akışı başlatmada yetersiz kalınca kendiliğinden yerleşebilirlikte sorun çıkmaktadır. Sahada zaman zaman karşılaşılan bu durum Şekil 3.15’de görüntülenmiştir (Roussel ve Cussigh, 2008). Büyük miktarlarda betonun aynı anda dökülme şansı az olduğundan mutlaka tabakalar arasında ara verilecektir. Bu durumda beton birkaç tabakadan oluşacaktır. Tiksotropi derecesi, KYB’nin zamana bağlı yerleşebilme ve alt tabaka ile kaynaşabilme özelliğini önemli derecede etkilemektedir.



Şekil 3.15 Tiksotropi derecesi yüksek KYB’nin kullanıldığı perdede oluşan soğuk derzler (Roussel ve Cussigh, 2008).

Tiksotropi derecesi yüksek KYB karışımlarının kaynaşma sorunu yarattığı deneysel olarak da ispatlanmıştır (Roussel, 2006). Şekil 3.16'da tiksotropi derecesi yüksek bir KYB karışımının, iki tabaka halinde bir L kutusuna dökümü iki eksenli olarak modellenmiştir. L kutusunun boyutları metre cinsinden olup, ilk tabaka aynı anda dökülen açık gri kısımdan oluşmaktadır. Şekil 3.16a'da ikinci tabakanın, aynı karışımın 5 dakika bekletildikten sonra dökülmesi durumunda ilk tabaka ile kaynaşması görülmektedir. Aynı karışımın 20 dakika bekletildikten sonra dökülmesi halinde elde edilen sonuç ise Şekil 3.16b'de verilmiştir. Kullanılan KYB'nin reometre kullanılarak ölçülen başlangıç eşik kayma direnci 50 Pa, ve plastik viskozitesi 50 Pa.s'dir. Şekil 3.16'da görüldüğü gibi, döküm tabakaları arasındaki bekleme süresinin artması, reolojik parametreleri arttırdığından tabakaların birbiri ile kaynaşma ihtimalini zayıflatmaktadır (Roussel, 2006).



Şekil 3.16 Tiksotropi derecesi yüksek karışımların zaman bağlı kaynaşma davranışı modeli, a) 5 dakika bekleme, b) 20 dakika bekleme (Roussel, 2006).

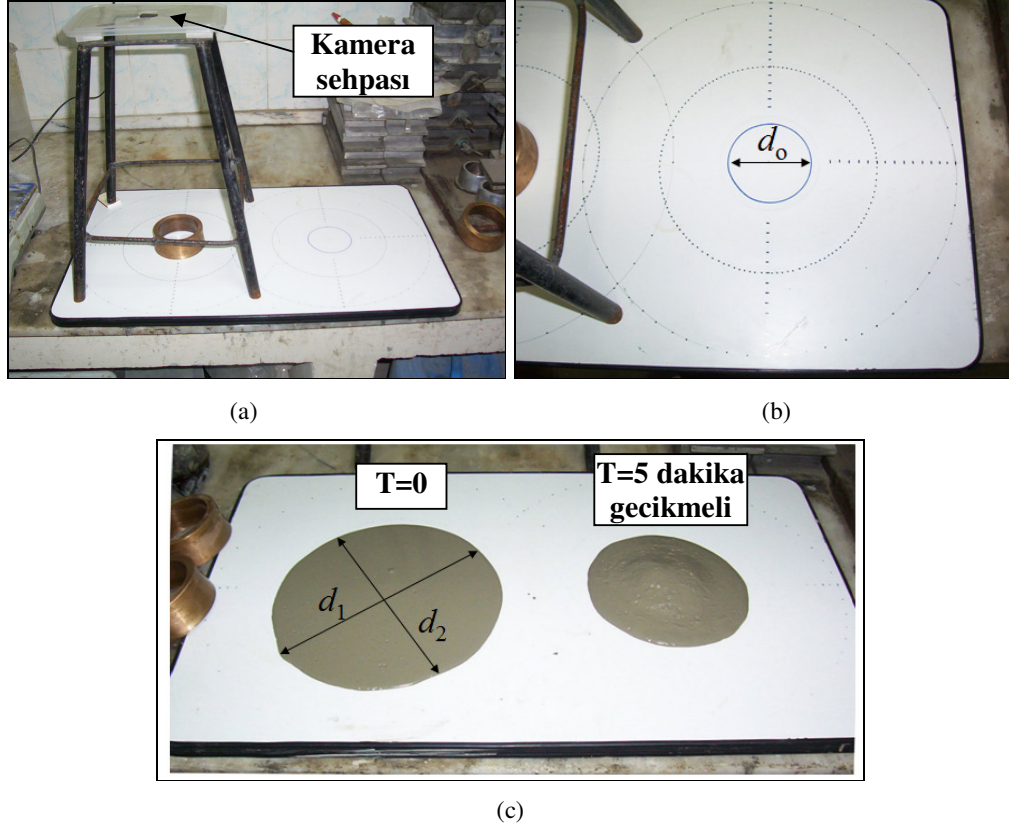
Bu bölümde hem deneysel olarak gösterilen, hem de literatürde son yıllarda gündeme gelen tiksotropi derecesi kaynaklı soğuk derz probleminin kendiliğinden yerleşen mikro betonun mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bir sonraki bölümde kaynaşma sorununun nedenini irdelemeye yönelik olarak, farklı mikro beton karışımlarının reolojik karakterizasyonu yapılacaktır. Mikro beton tasarımındaki her değişken davranışı etkilediğinden, tasarımın mümkün olduğunca sadeleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda daha basit mikro beton tasarımları kullanılmış olup, silis dumanı tasarımdan çıkartılmıştır. Silis dumanının büzülmeyi arttırması ve mikro betonda çok yüksek dayanım hedefinin olmaması nedenleriyle de tasarımdan çıkartılmasına karar verilmiştir.

3.3 Mikro Betonun Reolojik Karakterizasyonu

Bu bölümde mikro betonların taze haldeki davranışlarını belirlemek üzere yapılan çalışmalar sunulacaktır. Mikro betonun özellikle kendiliğinden yerleşebilir özellikte olması durumunda, taze haldeki davranışının tanımlanması hedeflenmiştir. Kendiliğinden yerleşebilirliği doğrudan etkilediği için; viskozite, eşik kayma gerilmesi ve ani kıvam kaybı gibi parametrelerin ölçümüne yönelik dolaylı ve doğrudan yöntemler kullanılmıştır. Bu amaçla ilk aşamada reometrelerden yararlanılması düşünülmüştür. Ancak tez kapsamında incelenecek karışımların sayısının çokluğu nedeniyle, öncelikle farklı S/Ç oranı ve akışkanlaştırıcı katkı dozajında mikro betonların taze haldeki davranışları alternatif bir deney yöntemi ile araştırılmıştır. Yapılan araştırmalar ve denemeler sonucunda, taze mikro betonun reolojik özelliklerini belirlemeye yönelik yeni ve pratik bir deney yöntemi geliştirilmiştir. Mini yayılma deney düzeneğine video kamera adaptasyonu ile taze mikro beton karışımlarının yayılma hızları (plastik viskozite ile ilişkilendirilecektir), nihai yayılma çapları (eşik kayma gerilmesi ile ilişkilendirilecektir) ve gecikmeli nihai yayılma çapları (ani kıvam kaybı (tikсотropi) ile ilişkilendirilecektir) ölçülmüştür. Elde edilen veriler ışığında seçilen mikro beton karışımlarının ayrıntılı reolojik karakterizasyonu özel bir reometre kullanılarak bir sonraki bölümde gerçekleştirilmiştir.

3.3.1 Mikro Betonların Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Deney Yöntemi

Mikro betonun kendiliğinden yerleşebilir özellikte olması durumunda, taze haldeki davranışının tanımlanması; özellikle plastik viskozite, eşik kayma gerilmesi ve ani kıvam kaybı (tikсотropi) derecesi gibi parametreleri dolaylı olarak tahmin etmeye yönelik çalışmalar yapılmasını gerektirmektedir. Bu amaçla hazırlanan deney yönteminde video kameralı yayılma çapı kaydı alınmaktadır. Kullanılan deney düzeneği Şekil 3.17’de görülmektedir. Pürüzsüz bir sunta lam yüzeyi tabla olarak kullanılmıştır. Yüzey üzerine yan yana iki adet deneyin yapılacağı yayılma konisi çapı, merkezden 200 mm’lik çap ve 400 mm’lik çap işaretlenmiştir (Şekil 3.17a, b).



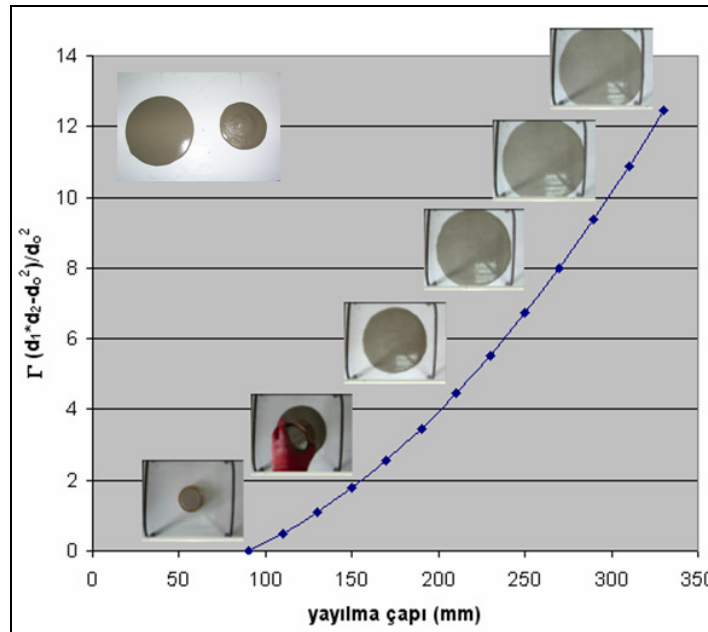
Şekil 3.17 Taze mikro beton deneylerinde kullanılan deney düzeneği.

Mikro beton karışımları Hobart mikser kullanılarak hazırlanmıştır. Karıştırma süresi 30 saniye çimento ve kireçtaşı tozu kuru karışımı, 30 saniye su ilavesi ile yaş karışım, akışkanlaştırıcı katkı ilavesi sonrası 30 saniye 62 devir/dakika hızla ve 2 dakika 125 devir/dakika hızla karışım yapılmıştır. Karıştırma süresi oldukça uzun tutulmuştur. Zira özellikle düşük S/Ç oranlı ve yüksek katkı dozajlı karışımlarda katkının tam olarak verimli çalışması karıştırma süresinin yeterliliğine bağlıdır (Williams, Saak ve Jennings, 1999, Chopin, Larrard ve Cazaciu, 2004). Hazırlanan karışım Şekil 3.17a’da görülen koni formundaki kalıp içine kendi ağırlığı ile yerleşecek şekilde boşaltılmıştır. Düşük akışkanlığa sahip karışımlarda (Sözü edilen karışımlar kendiliğinden yerleşen kıvamda değildir) kalıba yerleştirilirken sıkıştırma yapılmıştır. İleride anlatılacak olan “kritik dozajın” tespiti için bu karışımların hazırlanması gerekmiştir. Koni doldurulduktan sonra Şekil 3.17a’da görülen 500 mm yükseklikteki sehpa tablaya yerleştirilmiştir. Kamera bu sehpa ile video çekiminin yapılacağı alana merkezlenmiştir. Video çekimleri 30 saniyelik bir süre boyunca

yapılmıştır. Bu süre sonunda akıcı kıvamdaki bazı karışımlarda halen yayılma devam ettiğinden, nihai yayılma çapı ölçümü için karışım duruncaya kadar beklenilmiştir. Yayılma çapı ölçümleri tam dairesel olmayan durumda en büyük ve en küçük çapın ortalaması alınarak belirlenmiştir (Şekil 3.17c). Yayılma çapları aşağıdaki formül kullanılarak “bağıl yayılma oranına - Γ ” çevrilmiştir (Domone, 2006).

$$\Gamma_T = \frac{d_1 \cdot d_2 - d_o^2}{d_o^2} \quad (3.2)$$

Böylece kalıp çapından bağımsız hale getirilmiştir (Yahia, Tanimura ve Shimoyama, 2005). Bağıl yayılma alanıyla kalıp çapı arasındaki ilişki Şekil 3.18’de çizilmiştir. Aynı zamanda yayılma çaplarının fotoğrafları da gösterilerek Γ değerinin nasıl bir yayılma çapına karşılık geldiği gösterilmiştir. Tüm karışımlarda zamana bağlı bağıl yayılma değeri değişimi, video görüntülerinin 0,1 saniye hassasiyetle işlenmesi ile grafik haline getirilmiştir. Bağıl yayılma değerleri, tüm karışımlarda kalıp kaldırıldıktan sonraki 30. saniyede (Γ_{30}) ve yayılma durunca (nihai bağıl yayılma değeri: Γ_n) ölçülmüştür.



Şekil 3.18 Bağıl yayılma çapı ile 90 mm taban çaplı kalıp kullanılarak hazırlanan örneklerin yayılma çapları arasındaki ilişki.

Roussel (2007), tiksotropi derecesini ölçmek için pratik bir deney yöntemi ihtiyacına dikkati çekmiştir. Tiksotropi derecesi basitçe, bekleme anında ani kıvam kaybının derecesi olarak tanımlanabilir. Bu kapsamda incelenecek yöntemle ölçülen başlangıç ve gecikmeli nihai yayılma çapları, farklı karışımların tiksotropi derecesinin karşılaştırılmasında kullanılmıştır. Karışımların ani kıvam kaybı (tikstotropi) derecelerini ayırt etmek amacıyla, her karışım için yapılan deney, aynı tabla üzerinde 5 dakika gecikmeli olarak tekrarlanmıştır (Şekil 3.17c). Böylece hareketsiz bekleme süresinin sadece 5 dakika içinde, mikro betonda nasıl bir davranış farklılığına yol açtığı gösterilmiştir. Geliştirilen bu yöntemle aynı zamanda yayılma çapı - zaman grafikleri altında kalan alanlar kullanılarak farklı yorumlar yapılabilmektedir.

3.3.2 Video Kayıtları Kullanılarak İncelenen Karışımlar

İncelenen mikro beton karışımlarının toz fazı, ağırlıkça %50 çimento hamuru ve %50 kalker tozu kullanılarak hazırlanmıştır. Farklı S/Ç oranları ve akışkanlaştırıcı katkı dozajları taranmıştır. Seçilen S/Ç oranları çok geniş bir aralığa yayılarak, su miktarının artışı ile katkı miktarının azalışının davranışta yarattığı eşzamanlı değişiklik incelenmiştir. Böylece karışımların ayrışma sınırları zorlanmıştır. Deney değişkenleri Tablo 3.5’de sunulmuştur. Karışımların isimlendirilmesinde önce S/Ç oranı, sonra akışkanlaştırıcı katkı dozajı, en son olarak da deneyin yapıldığı zaman kodlanmıştır. Örneğin MB0,40-1,00-T5, S/Ç oranı 0,40 olan ve akışkanlaştırıcı katkı dozajı %1,00 olan mikro betonun 5 dakika gecikmeli deney sonucunu temsil etmektedir. Tüm karışımlar 20 ± 2 °C’de klima kontrollü bir odada hazırlanmıştır. İncelenen 38 örneğin video görüntülerinden alınan yayılma çapı gelişimi fotoğrafları Şekil 3.19’da toplu olarak verilmiştir. Şekil 3.20’de ise, tüm örneklerin bağıl yayılma oranı değişimleri zamana bağlı olarak çizilmiştir. Grafikten görüleceği üzere, farklı S/Ç oranı ve katkı dozajı kombinasyonlarında MB’nin, hem anlık hem de gecikmeli reolojik davranışı önemli farklılıklar göstermektedir.

Tablo 3.5 İncelenen karışımlar ve değişkenler.

S/Ç	Akışkanlaştırıcı katkı dozajı (%)	Deney zamanı	Ölçülen parametreler
0,40	0,63-0,94-1,25-2,50	T=0, T=5 dakika	$\Gamma_{30}, \Gamma_n,$ Γ_{30}', Γ_n'
0,50	0,00-0,31-0,63-0,94-1,25		
0,60	0,13-0,19-0,31-0,63		
0,70	0,13-0,25-0,38		
0,80	0,00-0,13		
1,00	0,00		

Γ

T=0

Γ_n

Γ_{30}

0 30

Γ

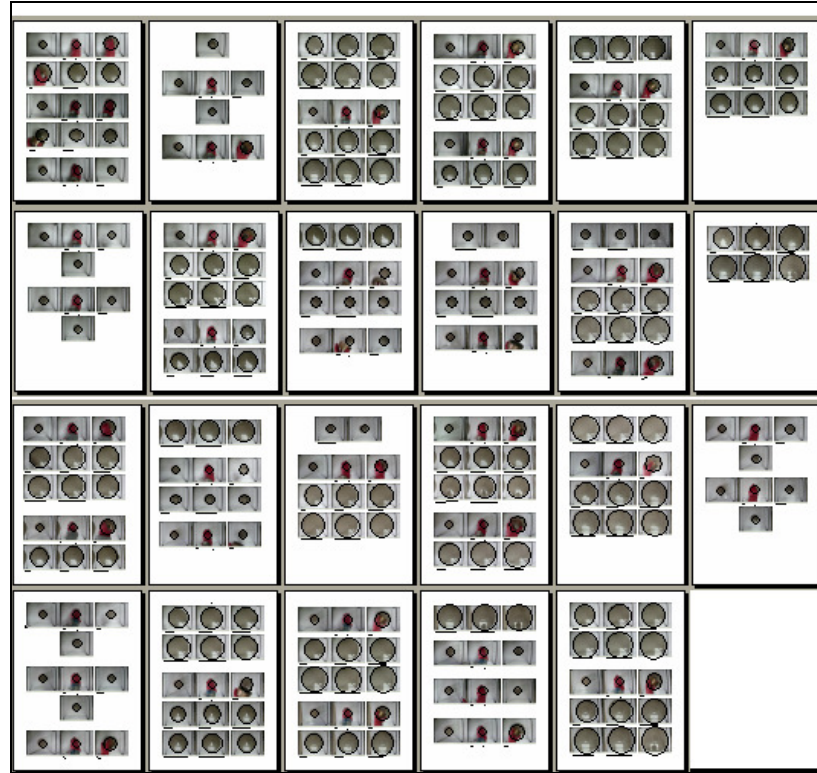
T=5 dakika gecikmeli

Γ_n'

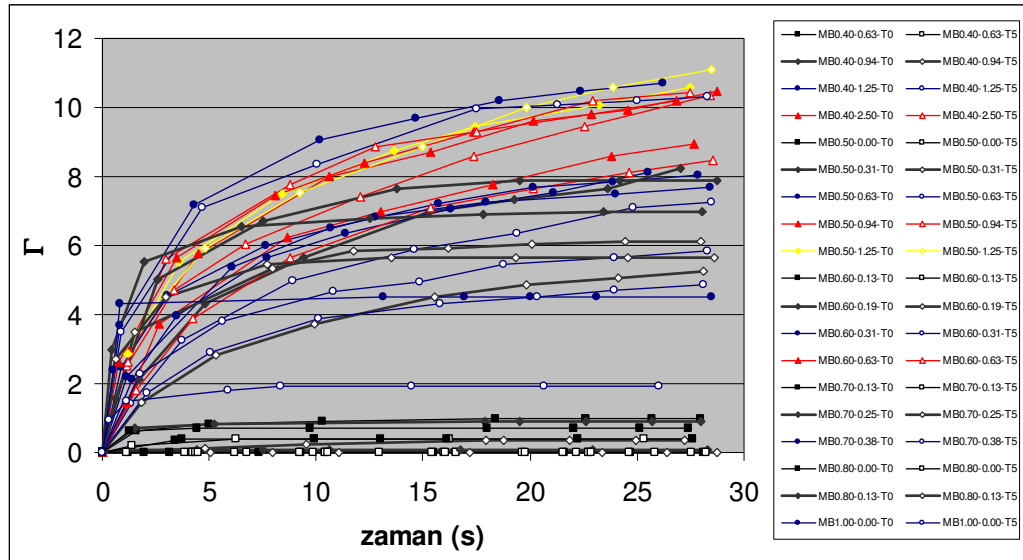
Γ_{30}'

300 330

T (s)



Şekil 3.19 İncelenen 19 mikro beton karışımının video görüntülerinden alınan yayılma çapı gelişimi fotoğrafları (T0 ve T5 için 19x2=38 deney).

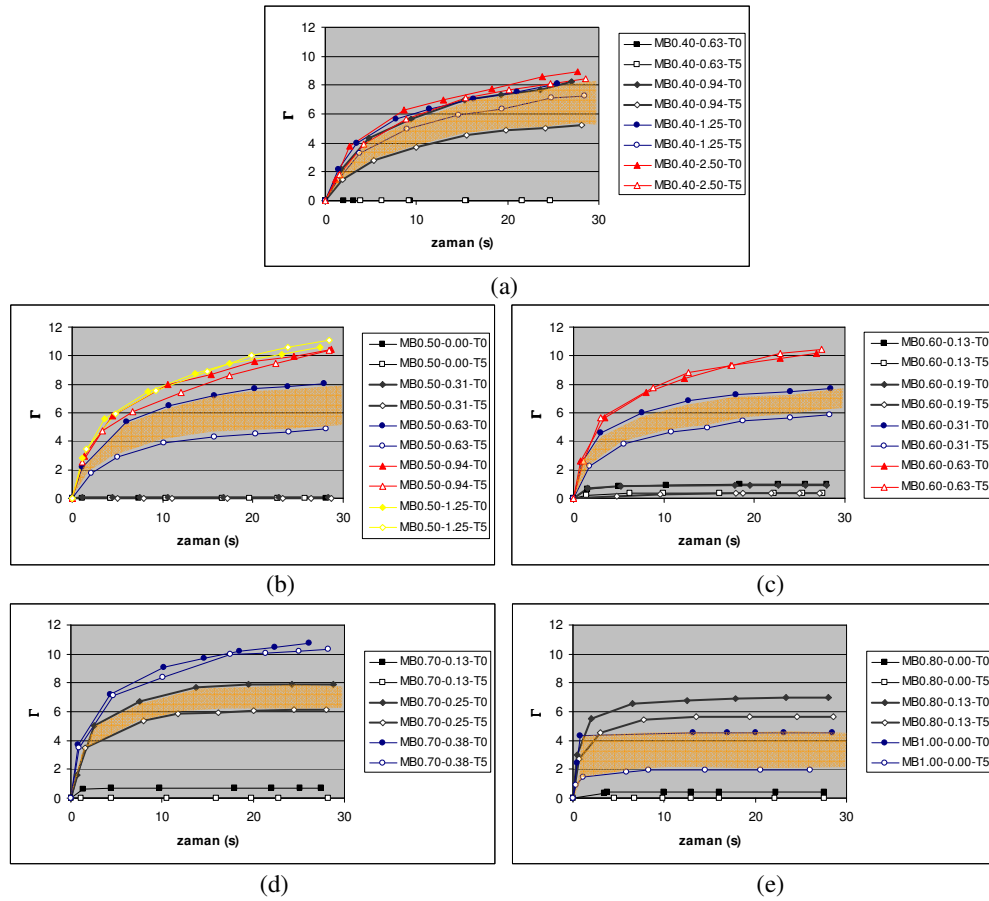


Şekil 3.20 İlk aşamada incelenen 19 MB karışımının video görüntülerinden alınan zamana bağlı yayılma oranı gelişimi grafikleri.

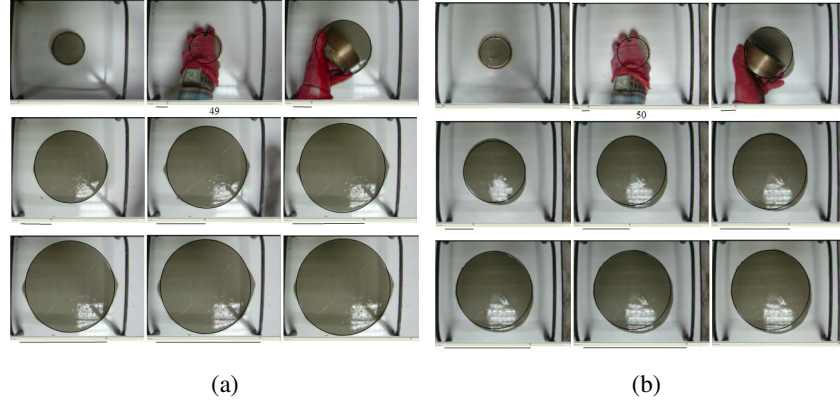
3.3.3 Video Görüntülerinden Elde Edilen Deney Sonuçları

Şekil 3.21’de S/Ç oranı ve katkı dozajı artışı ile yayılma oranı değişimi grafikleri sistematik olarak sunulmaktadır. Sırasıyla S/Ç oranı 0,40 – 0,50 – 0,60 – 0,70 ve 0,80-1,00 olan örneklerin grafikleri Şekil 3.21a’dan itibaren 3.21e’ye kadar verilmiştir. Bu deneylerde akışkanlaştırıcı katkı dozajı artırılarak yayılma çapları büyütülmüştür. Ayrışma sınırına kadar dozaj artımına devam edilmiştir. Bu yüzden farklı S/Ç oranlarında kullanılan akışkanlaştırıcı katkı dozajları farklılık göstermektedir. Tüm karışımların ilk andaki yayılma oranı-zaman ilişkisi, içi dolu işaretlerle 5 dakika gecikmeli grafikler ise, aynı şeklin içi boş işaretleriyle gösterilmiştir. Tüm şekillerde katkı dozajı düşük iken yayılma olmamakta, katkı dozajı artırılınca yayılma çapı da artmaktadır. Belirli bir dozajda gecikmeli yayılma ile başlangıçtaki yayılma arasındaki fark belirgin iken, daha yüksek dozajlarda bu fark azalmaktadır. Bu davranış genel olarak tüm serilerde gözlenmiştir. En büyük farklılığın gözlemlendiği dozajlardaki bölgeler Şekil 3.21a-e’de taranmıştır. Sözü edilen davranışı görsel olarak da açıklamak amacıyla Şekil 3.22’de Şekil 3.21a’daki grafiğin oluşturulduğu serilerden birinin video çekimi başladıktan sonraki 30. saniye görüntüleri sunulmuştur. Şekil 3.22a ve 3.22b’de görüldüğü üzere, MB0,40 %0,94

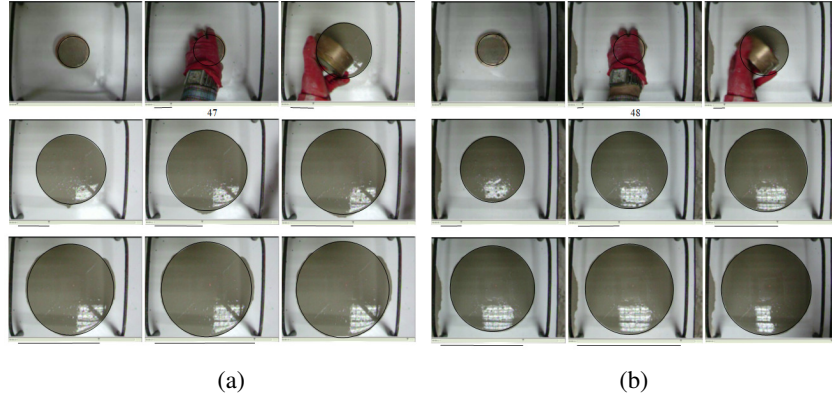
serisinde $T=0$ ve $T=5$ dakika arasındaki yayılma çapı farkı çok belirgindir. Daha yüksek katkı dozajlarında ise, yayılma çapının 5 dakikalık süredeki kaybı ihmal edilecek derecede azalmaktadır (Şekil 3.23a, 3.23b). Özetle ani kıvam kaybı en yüksek olan karışım MB0,40 %0,94 karışımı olup, bu karışım eğer karıştırılmaya devam edilmezse hızla akışkanlık özelliğini yitirmektedir. Öte yandan daha yüksek katkı dozajları ile hazırlanan karışımlarda 5 dakika hareketsiz olarak, kalıpta bekleyen örnekte kıvam kaybı yok denecek kadar azdır. Böylece katkı dozajının alt sınırının sadece *yayılma çapına göre değil de* ani kıvam kaybı derecesine göre de seçilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Çünkü başlangıç yayılma çapı açısından yukarıda sözü edilen karışımlar arasında önemli bir farklılık yoktur. Diğer taraftan katkı dozajı aşırı artırılıp ayrılmaya da yol açılmamalıdır. Farklı S/Ç oranlarında hazırlanan mikro betonlarda seçilen matris özelliklerine göre uygun katkı miktarının tespiti ile ani kıvam kaybı derecesinin minimize edilebileceği görülmektedir.



Şekil 3.21 Mikro betonların farklı S/Ç oranı ve katkı dozajlarında bağıl yayılma oranlarının zamana göre değişimi: S/Ç oranı a) 0,40, b) 0,50, c) 0,60, d) 0,70, e) 0,80-1,00.



Şekil 3.22 S/Ç oranı 0,40 olan ve %0,94 katkı içeren karışımın; a) ilk andaki, b) 5 dakika gecikmeli yayılma çapı gelişimi.

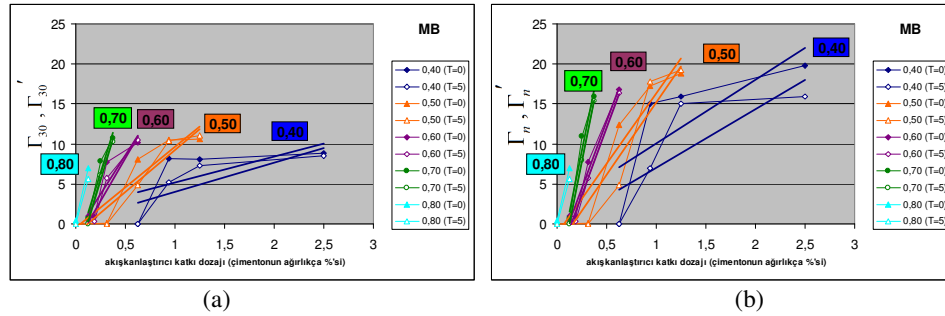


Şekil 3.23 S/Ç oranı 0,40 olan ve %1,25 katkı içeren karışımın; a) ilk andaki, b) 5 dakika gecikmeli yayılma çapı gelişimi.

Video kamera ile elde edilen zamana bağlı yayılma çapı gelişim grafiklerinden oldukça çok sayıda sonuç çıkarmak mümkündür. Örneğin yüksek S/Ç oranlı ve düşük katkı dozajlı karışımların yayılma hızları başlangıçta çok yüksek iken, düşük S/Ç oranlı ve yüksek katkı dozajlı karışımlara kıyasla yayılma daha kısa sürede durmaktadır. Bu durum yüksek S/Ç oranlı ve düşük katkı dozajlı karışımların göreceli olarak düşük viskoziteli ve yüksek eşik kayma gerilmeli olduklarını göstermektedir (Şekil 3.21).

Şekil 3.24a ve 3.24b’de farklı S/Ç oranları için sırasıyla, otuzuncu saniyedeki (Γ_{30}) ve nihai (Γ_n) bağıl yayılma oranları verilmiştir. İlk andaki ölçümlerden elde edilen sonuçlar içi dolu işaretlerle, 5 dakika gecikmeli ölçümden elde edilen sonuçlar

içi boş işaretlerle verilmiştir. Akışkanlaştırıcı katkı dozajının bağıl yayılma alanı oranına etkisi, düşük S/Ç oranlarında daha az iken, S/Ç oranı arttıkça yayılma çaplarındaki artış özellikle, nihai yayılma oranı dikkate alındığında belirginleşmektedir. Zaten akışkanlaştırıcı olan suyun varlığında katkının etkisi daha kuvvetli olmaktadır. Nihai yayılma çapı için farklı kökenden akışkanlaştırıcılar kullanılarak benzer sonuçlar; Domone (2006), Hanehara ve Yamada (2008) tarafından da rapor edilmiştir. Örneğin yüksek bir S/Ç oranında katkı dozajını %0,1 arttırmak Γ değerini 10 misli arttırırken, düşük bir S/Ç oranında katkı dozajını aynı oranda arttırmak nihai yayılma oranına önemli bir etki yapmamaktadır. Çok yüksek S/Ç oranında (0,80), 30. saniye yayılma oranı ile nihai yayılma oranı aynı iken, aradaki S/Ç oranlarında nihai yayılma oranı 30. saniyedeki yayılma oranına göre %50 veya daha fazla yüksek olabilmektedir. Akışa devam etme süresi, aradaki S/Ç oranlarında (0,70 – 0,60 – 0,50) daha fazladır.



Şekil 3.24 Otuzuncu saniyedeki (a) ve nihai (b) yayılma alanı değerlerinin akışkanlaştırıcı katkı dozajı ile farklı S/Ç oranlarında değişimi.

Gecikmeli yayılma deneylerinden elde edilen sonuçlar, ani kıvam kaybı derecesinin (tikсотropi) mikro betonun S/Ç oranı ve katkı dozajı ile yakından ilişkili olduğunu göstermiştir. Mikro betonların ani kıvam kaybının S/Ç oranı – katkı dozajı kombinasyonlarına göre değişimi, nihai bağıl yayılma oranları dikkate alınarak sırasıyla Şekil 3.25’de sütun grafik haline getirilmiştir. Beşinci dakikadaki nihai bağıl yayılma oranının ilk andaki değere oranı, (Γ_n' / Γ_n) 1’e yakın olan örneklerde tikсотropi derecesi düşük iken, 1’den küçük örneklerde tikсотropi kaynaklı ani kıvam kaybı derecesi artmaktadır. Diğer bir deyişle, ikinci gruba giren karışımlarda

Şekil 3.26a'daki grafikte görülen, nihai bağıl yayılma değerleri (Γ_n), 0-5, 5-10, 10-15 ve 15-20 arasında gruplandırılarak, bu gruplara giren karışımların alansal dağılımları, katkı dozajı ve S/Ç oranına göre çizildiğinde Şekil 3.26b'deki grafik elde edilmiştir. Bu grafiğe göre, ayrışma riski yaratmadan elde edilebilecek en akıcı mikro beton karışımları, S/Ç oranı ~0,40-0,50 aralığında ve katkı dozajı ~%1-1,4 aralığındaki karışımlardır. Elde edilen bu bulgular ışığında bir sonraki bölümde reometre yardımıyla yapılacak reolojik karakterizasyonda, S/Ç oranı 0,44 olan ve üç farklı dozajda akışkanlaştırıcı katkı içeren mikro betonlar incelenecektir.

Buraya kadar sözü edilen araştırmalarda mikro betonların eşik kayma gerilmeleri (nihai yayılma alanı) ve tiksotropi dereceleri (gecikmeli yayılma alanı farklılıkları) incelenmiştir. Mikro betonların video kamera kayıtlarından yayılma hızları ile ilgili sonuçlar çıkarmak da mümkündür. Mikro betonların belirli bir çapa ulaşmaya kadar geçen süre ölçümleri de, akışkan kıvamdaki bu malzemelerin viskozitesi ile ilişkilendirilebilir. Bu çalışmada mikro betonların tabla üzerine işaretlenen 200 mm'ye ulaşma süreleri ($\Gamma=4$ 'e karşılık gelmektedir.) ölçülmüştür. Yayılma çapı 200 mm'ye ulaşamayan örneklerde ise, doğal olarak plastik viskozite ölçülememiştir. Ancak bu örneklerin kendiliğinden yerleşebilirlik açısından plastik viskozitelerinin çok yüksek olduğu yorumu yapılabilir. Bu tür örnekler yıldız ile işaretlenmiştir (Tablo 3.6). Alternatif olarak tüm karışımların yayılma oranı - zaman eğrilerinin başlangıç kısmındaki bölgenin eğimi de ölçülerek plastik viskozite ile ilişkilendirilebilir. Ayrışma problemi olan karışımların S/Ç oranları ve dozajları da Tablo 3.6'da işaretlenmiştir. Hem ilk anda hem de 5 dakika gecikmeli deney sonuçları sırasıyla Tablo 3.6a ve 3.6b'de sunulmuştur. Akıcı özellikteki karışımlarda aynı S/Ç oranında, katkı dozajı artışı ile akış hızlanmakta, diğer bir deyişle viskozite azalmaktadır. Öte yandan 5 dakika gecikmeli deneylerde belli bir çapa ulaşmak için gerekli akış süresi başlangıçta yapılanlara kıyasla artmakta (akış yavaşlamakta) dolayısı ile viskozite de artmaktadır (Tablo 3.6b). Ayrıca, gecikmeli yayılma deneyi verilerinden (Tablo 3.6b) tiksotropinin, yayılma çapının yanı sıra, yayılma hızını da etkilediği belirlenmiştir. Böylece tiksotropinin hem eşik kayma gerilmesini hem de viskoziteyi arttırdığı ortaya çıkmıştır. Etkinin şiddeti yüksek miktarda akışkanlaştırıcı katkı kullanıldığında (ayrışma bölgesine çıkmamak şartıyla) azalma göstermektedir.

Tablo 3.6a Mikro betonların ilk anda (T=0), 200 mm çapa ($\Gamma=4$) ulaşma süreleri (s)

T=0 dakika, ilk anda	200 mm çapa (Γ=4) ulaşma süreleri (s)					
	S/Ç oranı					
Katkı dozajı (Çimento ağırlığınca, %)	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	1,00
0,13	*	*	*	*	0,9	
0,19	*	*	*	*	ayırışma bölgesi	
0,25	*	*	*	2		
0,31	*	*	2.2			
0,38	*	*		1		
0,63	*	3,9	2	ayırışma bölgesi		
0,94	4,5	2,5	ayırışma bölgesi			
1,25	3,5	2,1				
2,50	3,1	ayırışma bölgesi				

Tablo 3.6b Mikro betonların 5 dakika gecikmeli (T=5) 200 mm çapa ($\Gamma=4$) ulaşma süreleri (s)

T=5 dakika gecikmeli	200 mm çapa (Γ=4) ulaşma süreleri (s)					
	S/Ç oranı					
Katkı dozajı (Çimento ağırlığına, %)	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	1,00
0,13	*	*	*	*	2,5	
0,19	*	*	*	*	ayırışma bölgesi	
0,25	*	*	*	3,6		
0,31	*	*	7			
0,38	*	*		1,5		
0,63	*	11,8	2	ayırışma bölgesi		
0,94	12,1	2,8	ayırışma bölgesi			
1,25	6,3	2,1				
2,50	4,2	ayırışma bölgesi				

3.3.4 Sonuçlar ve Değerlendirme

Akıcı kıvamdaki çimento bazlı kompozitlerin reolojik davranışlarının karakterizasyonunda video kamera ile bağlı yayılma oranı – zaman grafiklerinin elde edilmesine olanak sağlayan basit bir deney yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem

yardımları ile eşik kayma gerilmesi, viskozite gibi temel reolojik parametreler hakkında fikir edinmek ve incelenen karışımları karşılaştırmak mümkün olmaktadır.

Bu bölümde incelenen mikro beton tasarımlarında S/Ç oranının ve katkı dozajının farklı kombinasyonlarda reolojik özellikleri nasıl etkilediği belirlenmiştir. Yüksek S/Ç oranlı ve düşük katkı dozajlı karışımların yayılma hızları başlangıçta çok yüksek iken, düşük S/Ç oranlı ve yüksek katkı dozajlı karışımlara kıyasla yayılma daha kısa sürede durmaktadır. Bu durum yüksek S/Ç oranlı ve düşük katkı dozajlı karışımların göreceli olarak düşük viskoziteli ve yüksek eşik kayma gerilmeli olduklarını göstermektedir.

Geliştirilen yöntem ile mikro betonların ani kıvam kaybı ölçülerek tiksotropi kaynaklı problemleri olup olmadığı tespit edilebilmektedir. Tiksotropi derecesi başlangıçta elde edilen bağıl yayılma eğrileri ve gecikmeli eğri arasında kalan alan yardımı ile ölçülebilir. Bu alan ne kadar büyükse karışımın tiksotropi derecesi o kadar yüksektir.

Yalnızca nihai yayılma değerleri dikkate alınarak da tiksotropi derecesi yorumlanabilir. Bu amaçla, gecikmeli nihai bağıl yayılma değeri (Γ_n') ile başlangıçtaki nihai bağıl yayılma değeri Γ_n arasındaki oran kullanılabilir. $\Gamma_n'/\Gamma_n = 1$ durumunda tiksotropi sorunu yoktur. Γ_n'/Γ_n oranı 1'in altına indikçe tiksotropi derecesi artmaktadır.

Tiksotropi derecesi incelemelerinden belli bir S/Ç oranı için katkı dozajının alt sınırının, yayılma çapının yanı sıra, ani kıvam kaybı derecesine göre de seçilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Zira başlangıç yayılma çapı açısından benzer olan karışımların ani kıvam kayıpları çok farklı olabilmektedir.

Ayrışma riski yaratmadan elde edilebilecek en akıcı mikro beton karışımları S/Ç oranı ~0,40-0,50 aralığında ve katkı dozajı ~%1-1,4 aralığındaki karışımlardır. Katkı dozajı taraması yapılarak, farklı tiksotropik davranış gösteren karışımların

incelenmesi amaçlanmıştır. Elde edilen bu bulgular ışığında, bir sonraki bölümde reometre yardımıyla yapılacak reolojik karakterizasyonda, S/Ç oranı 0,44 olan ve üç farklı dozajda akışkanlaştırıcı katkı içeren mikro betonlar incelenecektir. Söz konusu mikro betonlardan, matris bünyesine lif kabul edebilecek en stabil ve en kolay işlenebilir karışım kullanılarak, farklı polimer kökenli lif takviyeli mikro betonların reolojik özellikleri araştırılacaktır.

3.4 Reometre Kullanılarak Yapılan Deneysel Çalışmalar

Taze mikro betonların reolojik karakterizasyonunun yapılması amacıyla, bilyeli bir reometre ile deformasyon hızı kontrollü yöntemler kullanılarak, üç aşamalı bir deneysel program gerçekleştirilmiştir.

İlk aşamada, karışımların çok düşük deformasyon hızlarında statik eşik kayma gerilmeleri ($\tau_{o,statik}$) ve başlangıç viskoziteleri (η_{basl}) ölçülmüştür. Karışımların reolojik davranışları herhangi bir ön işlem uygulanmadan belirlenmiştir. Bu aşamada karışımların bir kayma gerilmesine maruz kaldığında, ilk harekete geçme davranışları incelenmiş, karışımların *ilk anda harekete karşı (karıştırma) dirençleri* ölçülmüştür.

İkinci aşamada karışımlara uygulanan deformasyon hızları, belli kurallara bağlı olarak değiştirilerek, akma eğrileri elde edilmiştir. Akma eğrisi verilerinin Herschel Bulkley modeli yardımıyla analizi sonucunda, her akma eğrisi için dinamik eşik kayma gerilmesi ($\tau_{o,dinamik}$) ve nihai viskozite (η_{inf}) değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca akma eğrileri yardımıyla karışımların gösterdikleri deformasyon yumuşaması veya deformasyon sertleşmesi davranışları ortaya konulmuştur. Aynı zamanda akma eğrilerinin özelliklerini etkileyen faktörler incelenmiş, akma eğrilerinin arasında kalan histeresiz alanları yardımıyla incelenen örneklerin reolojik davranışları kıyaslanmıştır. Histeresiz alanlarının kullanılabilirliği tartışılmıştır. Tasarımların *akış sırasında harekete karşı dirençleri* bu aşamadaki yöntemlerle incelenmiştir.

Üçüncü aşamada ise, sabit deformasyon hızlarında viskozitenin zamana bağlı değişimi farklı deformasyon hızı seviyeleri için araştırılmıştır. Karışımların zamana bağlı olarak sabit deformasyon hızında tiksotropik (viskozitesi zamanla azalan) veya reopektik (viskozitesi zamanla artan) davranışları araştırılmış, çimento hamuru, harç ve mikro beton karışımları arasındaki farklılıklar ortaya konulmuştur.

Bu bölümde yukarıda sıralanan üç aşamanın; mikro beton tasarımları ve karşılaştırma amacıyla çimento hamuru, harcı karışımları üzerinde uygulanması ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sunulacaktır.

3.4.1 Reolojik İncelemeler için Hazırlanan Karışımlar

Reolojik incelemeler için 15 farklı karışım hazırlanmıştır. Bunlar lifsiz ve lifli mikro betonlar ile karşılaştırma amacıyla hazırlanan, farklı S/Ç oranlarındaki çimento hamurları ve çimento harçlarıdır (Tablo 3.7). Deneylerde kullanılacak reometrenin klasik reometrelerden farklı olması nedeniyle, çimento hamuru ve harç davranışının da tanımlanması, mikro betonla karşılaştırma yapmak için gerekli olmaktadır.

Bir önceki bölümde farklı S/Ç oranları ve akışkanlaştırıcı katkı dozajları kullanılarak hazırlanan mikro betonlar üzerinde yapılan “*zamana bağlı yayılma çapı değişimi karakterizasyonu*” çalışmalarından üç farklı mikro beton karışımının incelenmesine karar verilmiştir. Bu karışımlar daha önce de belirtildiği gibi S/Ç oranı 0,44 ve katkı dozajı %1,0, %1,2 ve %1,4 olan karışımlardır. Akışkanlaştırıcı katkı daha önceki bölümlerde kullanılan ile aynıdır. Çimento sınıfı da aynı olup, bu bölümde kullanılan CEM I 42,5R çimentonun, üretici firmadan alınan analiz raporu Tablo 3.8’de verilmiştir. Mikro beton karışımlarının tümünde ön deneyler sonucu seçilen, kireçtaşı tozu ve çimento, ağırlıkça %50 oranlarında kullanılmıştır. Bu aşamada reolojik parametreler henüz sayısal olarak tanımlanmamış olduğundan, hazırlanan karışımların farklılıkları, sadece aralarındaki görsel değişiklikler açıklanarak (yayılma çapları, nicel kıvam yorumları) sunulmuştur (Tablo 3.7). MB 1,0 karışımı, kohezif - yavaş akan bir kıvama sahip iken, MB 1,2 karışımının

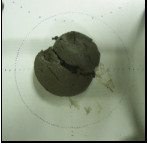
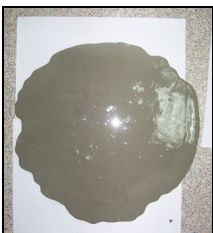
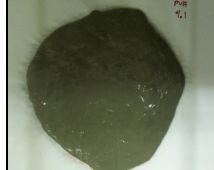
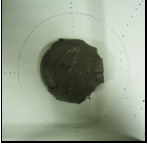
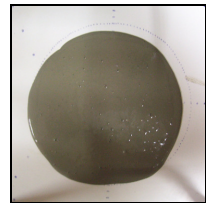
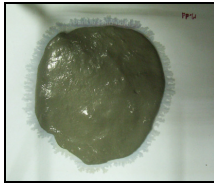
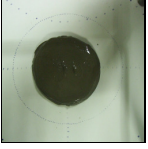
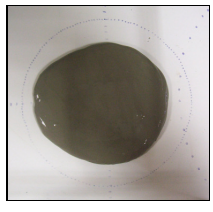
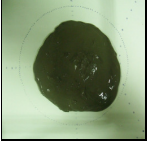
kendiliğinden yerleşen ve stabil bir kıvamı vardır. MB 1,4 karışımı ise göreceli olarak daha yüksek katkı dozajı nedeniyle başlangıçta oldukça cıvık (ayrışmaya eğilimli derecede akıcı) bir kıvamdadır. Nihai yayılma çapları sırasıyla 210, 310 ve 350 mm'dir (Tablo 3.7). Özellikle cıvık ve kohezif mikro betonlar marjinal olup, ayrışma veya akamama eğilimleri bu dozajların dışına doğru gidildikçe belirginleşmekte, alt ve üst sınırların dışına çıkmak bu tasarımda kendiliğinden yerleşebilirliği olumsuz yönde etkilemektedir.

Lifli mikro beton tasarımları polimer kökenli lifleri kabul edebilecek en stabil karışım olan MB 1,2 matrisi kullanılarak hazırlanmıştır. Bu kapsamda üç farklı lif (Polivinil alkol (PVA), polipropilen (PP) ve yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE)) toplam hacmin %1 ve %2'si oranlarında karışıma ilave edilerek lifli mikro beton serileri hazırlanmıştır. Liflerin tümü dairesel kesitli olup, çap ve boyları sırasıyla 30 mikron – 8 mm, 40 mikron – 12 mm ve 18 mikron – 10 mm'dir. Boy/çap oranları ise, yine sırasıyla 267, 300 ve 555'dir. Liflerin mekanik özellikleri ise bu bölümde önemli olmadığı için 4. Bölüm'de verilmiştir. Lif dozajı hacimce %1 iken işlenebilirliği en az etkileyen lif, PVA lifi olmuştur daha sonra PP lifi gelmektedir. YYPE lifler ise %1 kullanım oranında işlenebilirliği daha çok etkilemiştir. Lif dozajı hacimce %2'ye çıkarıldığında işlenebilirliği yine en az etkileyen lif PVA olup, YYPE lif ile bu dozajda matrisi karıştırmak mümkün olmamıştır. Bu yüzden %2 dozajlı YYPE lifli karışım, deney programından çıkartılmıştır. PP lifin %2 oranında kullanımında ise, sonraki bölümlerde açıklanacağı üzere örnek, kalıba yerleştirilirken perdelanabilirlik sorunu ortaya çıkmaktadır. Ayrıca reometre incelemelerinde kilitleme problemlerine yol açabilmektedir.

Mikro betonların davranışları ile karşılaştırma amacıyla tüm incelemelerde çimento hamuru ve harç karışımlarının davranışları da aynı yöntemler kullanılarak karakterize edilmiştir. Çimento hamurlarının kıvamı oldukça sulu, cıvıktan ($S/C=0,35$), katı kıvama ($S/C=0,25$) kadar değişmektedir. Çimento hamuru serilerinde, S/C oranı 0,025 oranında azaltılarak 5 farklı karışım hazırlanmıştır. Harç karışımları ise iki farklı S/C oranında hazırlanmıştır (0,50–0,60). Harç karışımlarında en büyük tane boyutu 1,8 mm olan standart silis kumu kullanılmıştır. Çimento

harçlarında kum/çimento oranı 3 olarak alınmış olup, S/Ç oranı 0,50 olan karışım “standart harç” karışımı olarak adlandırılmıştır. Ayrıca S/Ç=0,60 olan harç da incelenmiştir. Daha yüksek S/Ç oranlarında, dinamik reolojik parametrelerin ölçümünde ayrışma söz konusu olduğu için inceleme kapsamına alınmamıştır.

Tablo 3.7 Reolojik incelemeler için hazırlanan 15 farklı karışım

Çimento hamuru serisi	Çimento harcı serisi	Mikro beton serisi (lifsiz)	Lifli mikro beton serisi (matris MB 1,2'')	
ÇH-0,250'	Harç-0,50'	MB 1,4'' (cıvık)	PVA 1***	PVA 2***
				
ÇH-0,275'	Harç-0,60'	MB 1,2'' (stabil)	PP 1***	PP 2***
				
ÇH-0,300'		MB 1,0'' (kohezif)	YYPE 1***	-
				
ÇH-0,325'				
				
ÇH-0,350'				
				

* S/Ç oranı,

** Akışkanlaştırıcı katkı dozajı (çimento ağırlığının %'si),

*** Lif dozajı (toplam hacmin %'si),

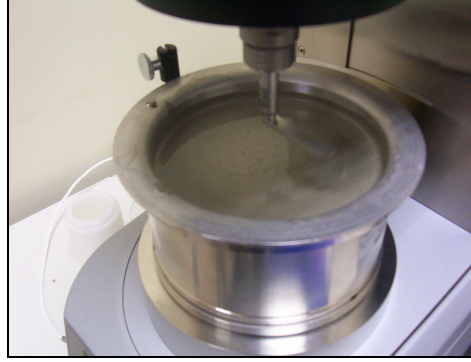
**** ÇH ve MB serisi fotoğraflar reometrede deneyler tamamlandıktan sonra karışımlar hazneden boşaltılıp çekilmiştir.

Tablo 3.8 Kullanılan CEM I 42,5R sınıfı Portland çimentosunun analizi.

Kimyasal kompozisyon (%)	CEM I 42,5R	Fiziksel ve mekanik özellikler	CEM I 42,5R
SiO ₂	18,66	2g basınç dayanımı (MPa)	27,3
Al ₂ O ₃	5,20	7g basınç dayanımı (MPa)	43,1
Fe ₂ O ₃	3,41	28g basınç dayanımı (MPa)	51,3
CaO	64,55	Özgül ağırlık	3,12
MgO	1,08	Blaine değeri (m ² /kg)	370
SO ₃	2,67	90 mikron elek üstü (%)	0,6
Na ₂ O	0,40	32 mikron elek üstü (%)	21,7
K ₂ O	0,79	Hacim sabitliği (mm)	0,5
Kızdırma kaybı	2,59	Vicat kıvam suyu (%)	28,0
Klor	0,010	Priz başlangıcı (dakika)	155
Çözünmeyen kalıntı	0,19	Priz bitişi (dakika)	215
Serbest CaO	1,61		
C ₃ S	66,99		
C ₂ S	2,96		
C ₃ A	8,01		
C ₄ AF	10,38		
Minör katkı (kalker)	4,48		

3.4.2 Mikro Betonların Hazırlanması

Karışımlar bir Hobart mikser kullanılarak hazırlanmıştır. Hobart mikserin yavaş ve hızlı dönme devirleri ASTM C 305 standardına uygun olup, sırasıyla 62 ve 125 devir/dakikadır. Tüm karışımların aynı hacimde olması sağlanmıştır. Böylece Hobart mikserde uygulanan karıştırma etkisinin her zaman eşit hacimde malzemeye uygulanması sağlanmıştır. Reometre haznesinin hacmi 500 cm³ olup, efektif çalışma hacmi 350-400 cm³ arasındadır. Karışımlar bu çalışmada yaklaşık 400 cm³'lük hacimde hazırlanıp reometre haznesine yerleştirilmiştir (Şekil 3.27). Kendiliğinden yerleşen karışımlar hazneye kendi ağırlığı ile yerleştirilirken, diğer karışımlar hazneye tokmaktama ve sarsma ile sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Karıştırma süresi ve yöntemi ile ilgili ayrıntılar Tablo 3.9'da listelenmiştir.



Şekil 3.27 Reometre ölçümlerinde kullanılan hazne ve bilyeli sistem.

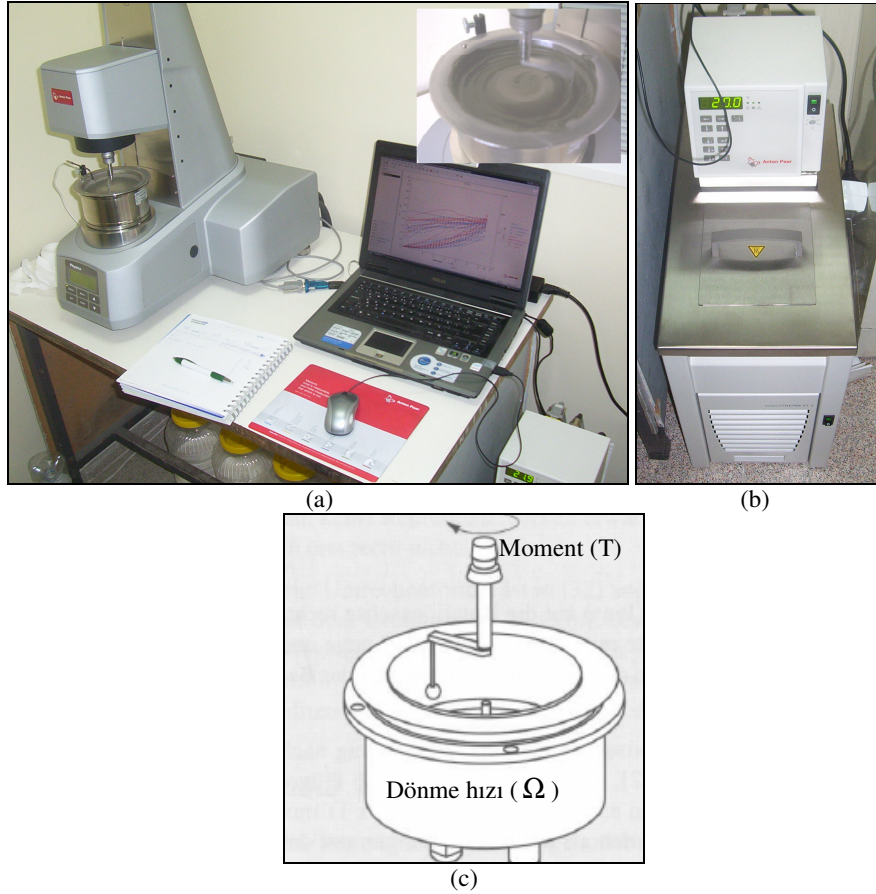
Tablo 3.9 Reolojik incelemeler için hazırlanan karışımların hazırlanma yöntemleri.

Çimento hamuru karışımları (3 dakika)	Harç (3,5 dakika)	Lifsiz mikro beton karışımları (3,5 dakika)	Lifli mikro beton karışımları (5 dakika)
Çimento – su karışımı 30 saniye 62 devir/dakika (yavaş) hızla karıştırılır.	Çimento – kum karışımı 30 saniye 62 devir/dakika hızla karıştırılır. Su ilave edilir ve 30 s daha karıştırılır.	Çimento ve taş tozu 30 saniye yavaş hızla karıştırılır. Su ilave edilir ve 30 s daha karıştırılır.	İlk 3,5 dakikalık işlem lifsiz mikro beton için uygulananın aynısı olup katkı dozajı sabittir (%1,2)
Mikser durdurulup kap indirilir. Tabanda karışmayan hamur varsa karıştırılır.	Mikser durdurulup kap indirilir. Tabanda karışmayan malzeme varsa karıştırılır.	Mikser durdurulup kap indirilir. Tabanda karışmayan malzeme varsa karıştırılır.	Hazırlanan kendiliğinden yerleşen kıvamdaki matrise lif ilavesi yapılır ve önce 30 saniye yavaş, sonra 1 dakika hızlı karıştırma yapılarak toplam 5 dakikada karışım hazırlanır.
30 saniye daha yavaş hızla karıştırılır.	30 saniye daha yavaş hızla karıştırılır.	30 saniye daha yavaş hızla karıştırılır. Bu aşamada akışkanlaştırıcı ilave edilir.	
2 dakika 125 devir/dakika (hızlı) hızla karıştırılarak toplam 3 dakikada karışım tamamlanır.	2 dakika hızlı karıştırılarak toplam 3,5 dakikada karışım tamamlanır.	2 dakika hızlı karıştırılarak toplam 3,5 dakikada karışım tamamlanır.	
1-2 dakika içinde karışım reometre haznesine yerleştirip ölçüme hazır hale getirilir.			

3.4.3 Reolojik Özelliklerinin Ölçümünde Kullanılan Reometre Sistemi

Reolojik ölçümlerde Anton Paar firmasının Physica MCR 51 serisi reometresi kullanılmıştır. Reometre sistemi farklı ölçüm sistemlerinin monte edilebildiği hassas bir ölçüm başlığı, bilgisayar, Rheoplus yazılımı ve su banyosundan oluşmaktadır (Şekil 3.28). Rheoplus yazılımı ile çeşitli amaçlara yönelik küçük programlar (makrolar) oluşturularak reometre programlanabilmekte, istenilen aşamaların, istenilen zaman aralıklarında otomatik olarak uygulanması sağlanabilmektedir. Ölçüm sistemi olarak bilyeli ölçüm düzeneğinden (Ball measuring system – BMS)

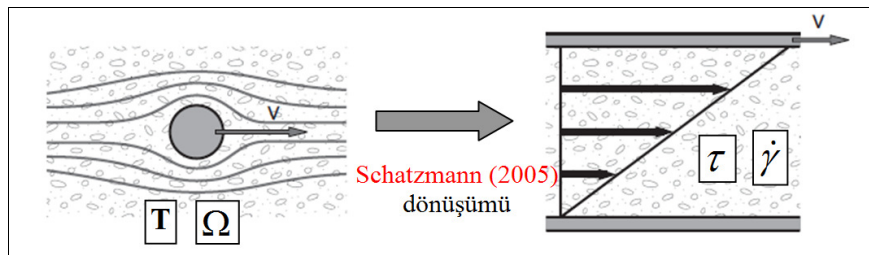
yararlanılmıştır. Bilye çapı 8 mm olup, bilye eksantrik bir kol vasıtası ile karışım içinde döndürülmektedir. Bilyenin karışım içinde sürüklenmesi sırasında, dönme hızı ve moment ölçülerek reolojik parametrelere ulaşılmaktadır. Bu sistemin limitleri, incelenecek karışımlar açısından önemli olup, kısaca özetlenecektir: MCR51'e bilyeli sistem monte edildiğinde, elde edilebilecek *en yüksek deformasyon hızı* 35 s^{-1} 'dir. Bu deformasyon hızı, 8 mm'lik bilyeli sistemin *60 devir/dakika'lık hızla* dönmesine eşdeğerdir. Aynı zamanda MCR51 reometresinin *moment (tork) kapasitesi* 125 mNm olduğu için, çıkılabilecek *en yüksek kayma gerilmesi değeri de sınırlı olup* 2850 Pa 'dır. İncelenecek malzemelerin bu sınırlamalar içinde kalıp kalmayacağı malzemelerin bileşenleri ve kıvam özellikleri ile yakından ilişkilidir.



Şekil 3.28 Anton Paar - Physica MCR 51 Reometresi, a) Bilyeli reometre sistemi, b) Su banyosu, c) Bilyenin ölçüm haznesinde hareketi.

Reometre iki farklı modda çalışmaya olanak sağlamaktadır. İlk mod deformasyon kontrollü ölçümler içindir. Bu modda, karışımın içinde sürüklenen bilyenin istenen deformasyon hızlarında döndürülmesi için gerekli anlık moment değerleri ölçülmektedir. Ölçülen ham veriler; dönme hızı (Ω) ve moment (T)'tir. Rheoplus programıyla ham verilere Schatzmann (2005) dönüşümü yapılmıştır. Böylece, dönme hızı (Ω), deformasyon hızına ($\dot{\gamma}$), moment (T) ise kayma gerilmesine (τ) dönüştürülmüştür (Şekil 3.29). Kayma gerilmesi ve deformasyon hızı arasındaki ilişki belli olduğundan anlık viskozite değerleri de program tarafından hesaplanmaktadır. Reometrenin yazılımı ile gerekli dönüşümler yapılarak *deformasyon hızı – kayma gerilmesi*, *deformasyon hızı – anlık viskozite*, *kayma gerilmesi – zaman*, *viskozite – zaman* ilişkileri çıkartılabilmektedir. Böylece karışımların reolojik parametreleri (*eşik kayma gerilmesi*, *viskozite*, *pseudoplastik davranış*, *histeresiz alanları*, *tiksotropi*...) ölçülebilmektedir.

İkinci modda ise reometrenin karışım içinde sabit bir moment yaratarak dönmesi için gerekli deformasyon miktarı ölçülmektedir. Bu mod ise gerilme kontrollü mod olarak adlandırılmaktadır. Gerilme kontrollü ölçümlerle karışımların sünme özellikleri, elastik ve viskoz davranışları arasındaki ilişki belirlenebilmektedir. Gerilme kontrollü ölçüm yapan reometrelerde, hedeflenen gerilmenin yakalanması için çok düşük deformasyon hızlarında çalışabilme önemli bir hassasiyet göstergesidir (Koehler ve Fowler, 2004). Physica MCR 51 serisi reometre ile deformasyon hızı $0,001 \text{ s}^{-1}$ 'e kadar düşürülebilmekte ve hassas ölçüm yapılabilmektedir. Tez kapsamında sadece deformasyon kontrollü yöntemler kullanılmıştır.



Şekil 3.29 Schatzmann (2005) dönüşümü ile reolojik parametrelerin elde edilmesi.

Tablo 3.9'a göre hazırlanan karışımlar, reometre haznesine yerleştirildikten sonra hazne reometreye monte edilmiştir. Deneylerin sabit sıcaklıkta yapılabilmesi için reometre ile koordineli olarak çalışan bir su banyosu kullanılmıştır (Anton Paar Viscotemp 2 VT-2). Rheoplus programı yardımıyla reometre haznesi tabanı sürekli sabit sıcaklıkta tutulacak şekilde programlanmıştır ($20^{\circ}\text{C} \pm 1$). Örneklerin hazırlanması da yaklaşık 20°C 'de gerçekleştirildiğinden sıcaklık dengesi kısa zamanda gerçekleşmiştir.

3.4.4 Reolojik İncelemelerde Kullanılan Yöntemler

Reolojik incelemelerde kullanılan yöntemler üç ana başlık altında gruplandırılmıştır. Her yöntemden elde edilen grafikler ve çıktılar Tablo 3.10'da özetlenmiş olup, ayrıntılar, yöntemlerin uygulanma amaçları ve sonuçlar ilgili bölümlerde sunulacaktır.

Tablo 3.10 Reolojik incelemelerde kullanılan yöntemler.

Yöntem	Elde edilen grafikler	Elde edilen çıktılar
Statik eşik kayma gerilmesi ve başlangıç viskozitesinin belirlenmesi	Kayma gerilmesi - zaman Viskozite - zaman	* $\tau_{o,statik,max}$ * $\tau_{o,statik,min}$ * η_{basl}
Akma eğrilerinin belirlenmesi	Kayma gerilmesi - deformasyon hızı Viskozite - deformasyon hızı	* $\tau_{o,dinamik}$ * η_{inf} * Pseudoplastik ve dilatant davranış * Histeresiz alanı
Sabit deformasyon hızlarında viskozite değişiminin incelenmesi	Viskozite - zaman	*Tiksotropik ve reopektik davranış

* Elde edilen çıktılardaki kısaltmalar ilgili bölümlerde tanımlanacaktır.

Tablo 3.10'da görüldüğü gibi, eşik kayma gerilmesi (EKG) statik ve dinamik olarak ikiye ayrılmıştır. EKG'nin statik ve dinamik olarak iki farklı türünün olması, aslında çimento bazlı kompozitlerin tiksotropik davranışının bir sonucudur (Roussel, 2007). Karışım hazırlandıktan sonra zaman içinde maruz kaldığı kayma deformasyonu geçmişi, eşik kayma gerilmesini sürekli değiştirmektedir. Bu değişim

malzemenin tiksotropik davranışına bağlıdır. Karıştırma sonrası bekleme anında, malzemede flokülasyon meydana gelerek, zaman içinde anlık eşik kayma gerilmesi değerini belli bir değere kadar yükseltmektedir. Bu değer başlangıç anında “*statik EKG*” değeri olarak adlandırılabilir. Statik EKG, karıştırma geçmişine bağlı olup, malzeme karıştırılıp bekletildiğinde, anlık olarak çok farklı değerler alabilir. Statik EKG’nin değişimi kalıp içi hidrostatik basıncı etkiler, aynı zamanda kaynaşma problemlerine yol açabilir (Roussel, Geiker, Dufour, Thrane ve Szabo, 2007, Roussel ve Cussigh, 2008). Her karışımın EKG değerini limit değere yükseltecek bir flokülasyon karakteristik zamanı vardır. Akma sırasında, karışımın deflokülasyon derecesi de, EKG değerinin alt limitine ulaşma süresini belirler. Alt limit, akma eğrisi ile belirlenir ve “*dinamik EKG*” olarak adlandırılabilir. Dinamik EKG karışım özelliklerine bağlı olup kayma geçmişi vb. ön etkilerden etkilenmez çünkü zaten verilen etki ile dengeye ulaşmış bir akma eğrisi oluşmuştur. Ancak hidratasyon gelişimi nedeniyle zamana bağlı olarak dinamik EKG’de değişebilir (Roussel, 2007). Kısa vadede hidratasyon etkisi ihmal edilebileceğinden, ilk saatlerde dinamik EKG’nin çok fazla değişmediği kabul edilebilir (Jarny, Roussel, Rodts, Bertrand, Roy ve Coussot, 2005).

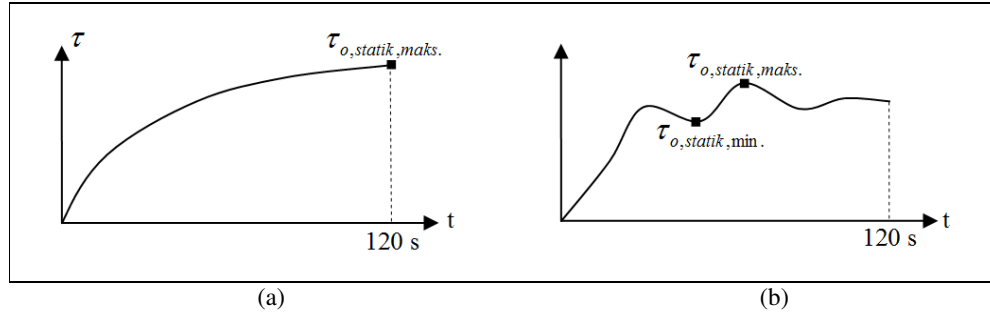
3.4.5 Statik Reolojik Parametrelerin Belirlenmesi

3.4.5.1 Statik Eşik Kayma Gerilmesi (EKG)

“Statik eşik kayma gerilmesi ($\tau_{o,statik}$)”, karışıma herhangi bir ön işlem uygulanmadan, karışım hazırlandıktan hemen sonraki eşik kayma gerilmesidir. Bu değer, karıştırma başlangıcından örneğin ölçüm kabına yerleştirilmesine kadar geçen süreye oldukça bağlıdır. Bu nedenle yapılan ölçümlerde, tüm karışımlar için yaklaşık olarak aynı sürede ölçüme başlanmasına özen gösterilmiştir. Statik EKG’nin tespiti için bilyenin karışım içinde 120 saniye boyunca, $0,1s^{-1}$ ’lik bir deformasyon hızında dönmesi için gerekli komut reometrenin yazılımına yüklenerek uygulanmıştır. Bilye, moment kapasitesini aşmayan karışımlarda bu deformasyon hızında, 120 saniyede yaklaşık $\frac{3}{4}$ turu tamamlamaktadır. Böylece bilyenin daha önce hiç sürüklenmediği $\frac{3}{4}$ turluk bölgedeki karışımın yarattığı sürüklenme direnci, 120 saniyelik sürede

ölçülmektedir. Daha yüksek deformasyon hızlarında bilye tam turu tamamladığı için daha önce sürüklendiği bölgeye dönmekte, bilye daha önce geçtiği yerden tekrar geçtiği için maruz kaldığı sürüklenme direnci azalmaktadır. Örselenmiş bölgedeki değerler, statik durumu temsil etmediği için bu bölümde dikkate alınmamıştır. Ancak bazı katı kıvamlı karışımlarda, hedeflenen $0,1s^{-1}$ 'lik bir deformasyon hızına ulaşmak mümkün olamamaktadır. Bilye, moment sınırının üzerinde bir dirençte, hedeflenen deformasyon hızına ulaşamadığından, bu tür karışımlarda $\frac{3}{4}$ turdan daha kısa bir mesafede deney tamamlanmaktadır. Statik EKG'nin elde edilmesinde, düşük deformasyon hızlarının kullanımı en uygun yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir (Power ve Zamaro, 2003, Leeman ve Winnefeld, 2007).

3.4.2 bölümünde karışım özellikleri ve hazırlanma yöntemleri verilen 5 çimento hamuru, 2 çimento harcı, 3 lifsiz MB, 3 lifli MB karışımları için elde edilen “kayma gerilmesi-zaman” ve “viskozite-zaman” grafikleri EK-B ve EK-C’de verilen şekillerde gruplandırılmıştır. Lif dozajının %2 olduğu MB karışımlarında, $0,1s^{-1}$ 'lik bir deformasyon hızında bilyenin kilitlenmesi nedeniyle inceleme yapılamamıştır. Bu grafiklerde, bilyenin karışımlar için sürüklenme sırasında yarattığı kayma gerilmesi değerlerinin değişimi görülmektedir. Katı kıvamlı karışımlarda sabit deformasyon hızında, zamana bağlı olarak ölçülen kayma gerilmesi değeri sürekli yükselirken, göreceli olarak daha yumuşak kıvamlı karışımlarda zamana bağlı olarak dalgalandığı, yükselip azaldığı belirlenmiştir. Bu dalgalanma karışımın içinde, bilyenin sabit bir deformasyon hızında ilerlemeyi hedeflerken zorlanmasından kaynaklanmaktadır. Bilyenin önündeki karışım, zaman zaman sıkışma, kasılma yaparak ilerlemeyi engelleyebilmektedir. Aynı zamanda karışım bileşenleri de (kum, lif..) bu dalgalanmayı arttırmaktadır. Sürekli artan kayma gerilmesi ölçümü durumunda, en büyük kayma gerilmesi değeri, “120. saniyedeki değer”, $\tau_{o,statik,maks}$ olarak alınmıştır. Kayma gerilmesinin artıp azaldığı (dalgalandığı) durumda ise, en yüksek kayma gerilmesi değeri $\tau_{o,statik,maks}$ olarak alınmıştır. Ayrıca ilk tepe noktasından sonraki en düşük kayma gerilmesi değeri de $\tau_{o,statik,min}$ olarak adlandırılmıştır (Şekil 3.30).

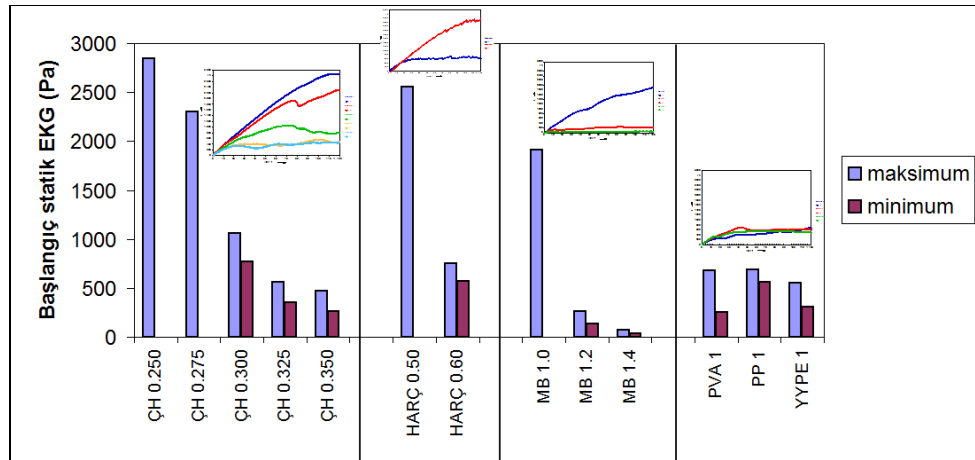


Şekil 3.30 En büyük ve en küçük statik EKG değerlerinin tespiti: a) Katı kıvamlı karışımlar, b) Göreceli olarak yumuşak kıvamlı karışımlar.

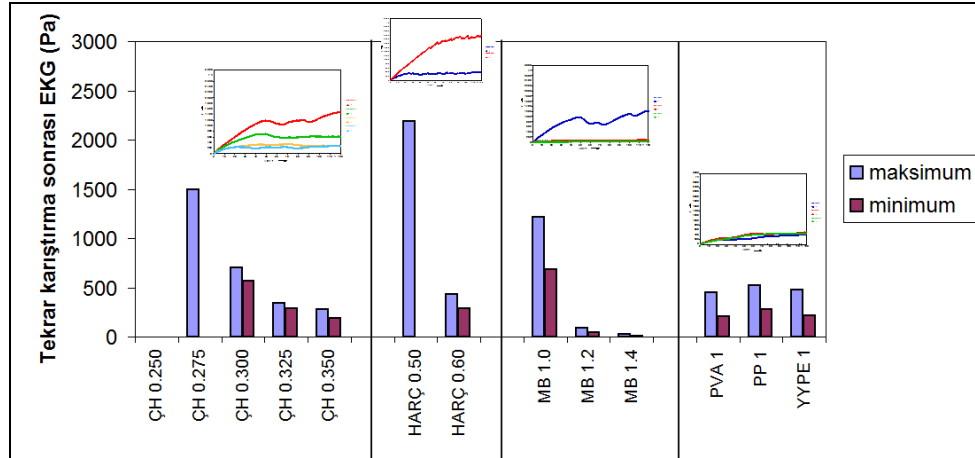
Şekil 3.30’da şematize edilen yöntem kullanılarak elde edilen tüm statik EKG değerleri Şekil 3.31’de topluca verilmiştir. EKG değerlerinin okunduğu grafikler ekte (EK-B) verildiği için buradaki grafikler küçük boyutlu olarak sunulmuştur. Düşük S/Ç oranlı çimento hamuru ve harç için başlangıç statik EKG değerleri oldukça yüksek iken (>2000Pa), S/Ç oranının artışı ile hızla azalmakta 500 Pa seviyelerine düşmektedir. Örneğin ÇH 0,250 örneğinin eşik kayma gerilmesi, kayma gerilmesi sınırı olan 2850 Pa’ı aşmıştır. Mikro beton örneklerinde ise katkı dozajının başlangıç statik EKG değerini hızla azalttığı ve 100 Pa’ın altına indirdiği belirlenmiştir. Akışkanlaştırıcıların statik EKG değerini azaltmakta suya kıyasla çok daha etkili oldukları görülmektedir. Lifsiz mikro beton örneklerinden MB1,2’ye %1 oranında lif katkısı ilave edilerek hazırlanan lifli MB’lerde, başlangıç statik EKG değerinin aynı katkı dozajı ile hazırlanan lifsiz karışıma göre yükseldiği görülmektedir. Liflerin başlangıç statik EKG değerini yaklaşık 200 Pa’dan 500 Pa seviyelerine çıkarttığı tespit edilmiştir (Şekil 3.31). Kayma gerilmesi zamana bağlı olarak dalgalanan örneklerden elde edilen en düşük statik EKG değerleri de aynı grafikte ikinci sütunlarda verilmiştir.

Başlangıç statik EKG değerinin zamana ve karıştırma geçmişine ne derece bağlı olduğunu göstermek amacıyla, tüm karışımlar ilk deney tamamlandıktan sonra yeniden 30 saniye süreyle karıştırılmış ve ölçüm kabına tekrar yerleştirilmiştir. Aynı yöntem tekrar uygulandığında 120 saniyelik ölçüm süresi sonunda elde edilen değerlerin sunulduğu grafikler Şekil 3.32’de verilmiştir. ÇH 0,250 örneği kayma gerilmesi sınırı olan 2850Pa’ı yine aştığı için tekrar edilmemiştir. Özellikle katı

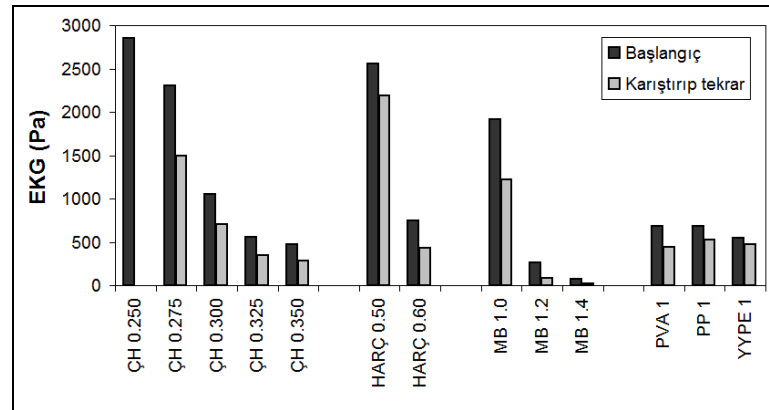
kıvamlı örneklerde, statik EKG değeri önemli derecede azalmazken, göreceli olarak yumuşak kıvamlı örneklerde yeniden karıştırma, statik EKG değerini ilk deneye kıyasla önemli ölçüde azaltmıştır. Statik EKG değerlerinin başlangıçtaki ve yeniden karıştırma sonrasındaki değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 3.33’de görülmektedir. Kendiliğinden yerleşebilirlik için gerekli ön şartlardan biri olan düşük EKG değerinin lifsiz ve %1,2 katkı içeren karışımlarda sağlandığı, ancak lifli örneklerde bilye yöntemi ile bulunan EKG değerinin her iki deneyde de yüksek olduğu belirlenmiştir. Yeniden karıştırmayla lifsiz MB matrisinde statik EKG değeri 100 Pa’ın altına inerken, lifli örneklerin statik EKG değerleri ortalama 500 Pa’dan 300 Pa mertebelerine inmiştir. Yeniden karıştırma en çok PVA lifli mikro betonların statik EKG değerlerini azaltmıştır. Burada liflerin matrisi tutucu, bilyenin sürüklenmesini engelleyici etkisi, statik EKG’nin artmasında temel rolü oynamaktadır. Çimento harçlarından S/Ç=0,50 olan karışım katı kıvamı nedeniyle oldukça yüksek statik EKG değeri vermiştir. S/Ç oranının arttırılması statik EKG değerini 500 Pa’a indirmiştir. S/Ç oranı 0,60 olan harç, az miktarda sıkıştırma enerjisi ile kalıba kolayca yerleşebilecek kıvamdadır. Lif içeren mikro betonların statik EKG değerleri, S/Ç oranı 0,60 olan harca benzemektedir. Bu açıdan %1 lif içeren mikro betonların kalıba az miktarda sıkıştırma enerjisi ile kolaylıkla yerleştirilebileceği söylenebilir.



Şekil 3.31 Çimento hamuru, harç ve mikro beton için başlangıç statik EKG değerleri (Küçük grafikler EK-B’de verilmiştir).



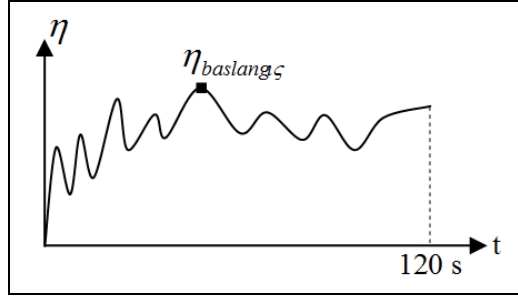
Şekil 3.32 Çimento hamuru, harç ve mikro beton için tekrar karıştırma sonrası EKG değerleri (Küçük grafikler EK-B’de verilmiştir).



Şekil 3.33 Çimento hamuru, harç ve mikro beton için başlangıç ve tekrar karıştırma sonrası EKG değerleri.

3.4.5.2 Başlangıç Viskozitesi

Karışımların statik EKG’lerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemle (120 s boyunca $0,1s^{-1}$ deformasyon hızında sürüklenme) aynı zamanda *anlık viskozite* – *zaman* grafikleri de elde edilebilmektedir. Anlık viskozite değeri çok düşük deformasyon hızlarında karışımların durağan halden *harekete geçtikten sonra* bilyenin sürüklenmesine karşı gösterdikleri anlık akma direnci olarak düşünülebilir. Her karışım için bu değerin en yüksek olduğu sürüklenme anında okunacak viskozite değeri “başlangıç viskozitesi, η_{basl} ” olarak alınmıştır. Şekil 3.34’de başlangıç viskozitesinin nasıl okunduğu bir örnekle şematize edilmiştir.

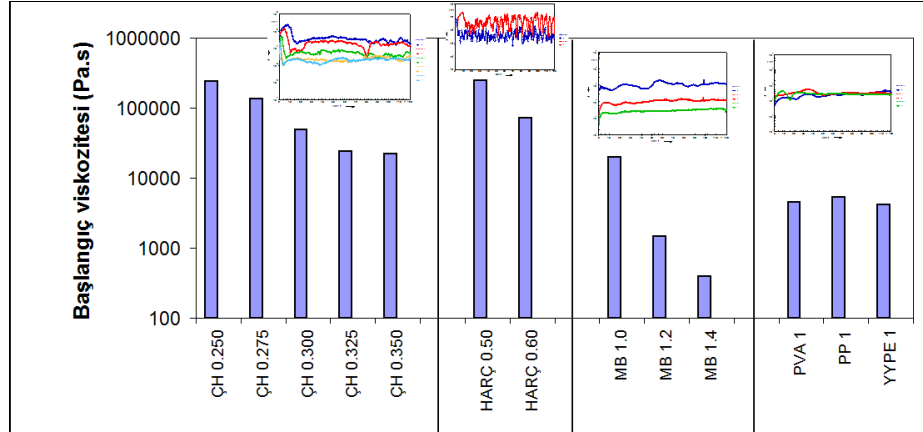


Şekil 3.34 Başlangıç viskozitesinin viskozite-zaman grafiğinden okunması.

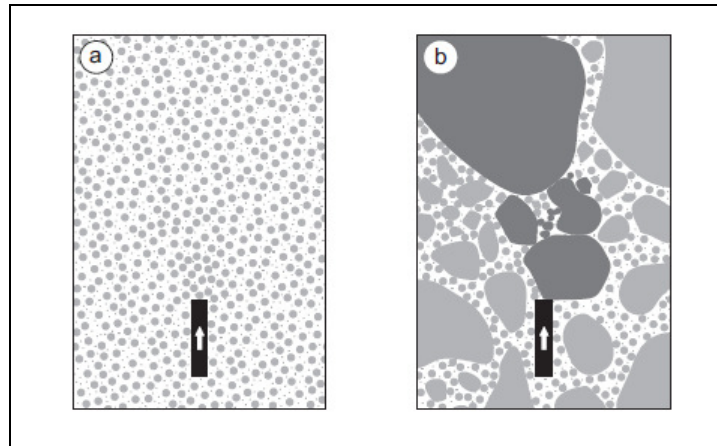
Şekil 3.35’de karışımların viskozite değerleri karşılaştırma amacıyla sütun grafiklerde verilmiş olup, her karışımın viskozite-zaman grafiği de küçük boyutlu olarak burada, ayrıca büyük boyutlu olarak da EK-C’de sunulmuştur. Başlangıç viskozite değerleri, farklı karışımlar için 100 Pa.s’den 250000 Pa.s’ye kadar çok geniş bir aralığa yayıldığından elde edilen grafikler logaritmik skalalı bir viskozite eksenini kullanılarak verilmiştir (Şekil 3.35).

Çimento hamurlarının başlangıç viskoziteleri 20000-200000 Pa.s aralığındadır. S/Ç oranı artışı ile viskozite 10 kat azalmıştır. Ancak yine de düşük deformasyon hızlarında örselenmemiş örnekte ölçülen başlangıç viskozitesi, oldukça yüksektir. Karışıma kum ilavesinin, viskozite-zaman grafiğini önemli derecede etkilediği, viskozite değerlerinin anlık olarak önemli derecede dalgalandığı gözlenmiştir. Bu durum bilye sürüklenirken karşısına çıkan kum taneciklerinin yarattığı takılmalardan kaynaklanmakta olup, Şekil 3.36’daki gibi şematize edilebilir (Schatzmann, 2005). Karışımda bulunan katı taneciklerin miktar ve boyutunun artması anlık viskozite değerlerini önemli derecede etkilemektedir. Aynı zamanda karışımda kum bulunmasının başlangıç viskozitesini arttırdığı gözlenmektedir. S/Ç oranının 0,60 olduğu çimento harcında bile, başlangıç viskozite değeri 100000 Pa.s’nin üzerindedir. Literatürde de karışımdaki kum oranı arttıkça taneler arasındaki etkileşimin artması nedeniyle, viskozite değerinin hızla arttığı rapor edilmektedir (Schatzmann, 2005). Mikro betonlarda ise kum olmadığı için böyle bir değişkenlik söz konusu değildir, eğriler daha duragandır. Başlangıç viskozitesi katkı dozajı artışı ile azalmakta 20000 Pa.s’den 400 Pa.s’ye düşmektedir. Viskozitenin aşırı düşmesi, stabilite problemleri yaratacağından çok yüksek katkı dozajının tercih edilmemesinde

yarar vardır. Yüksek katkı dozajı kullanılması halinde, tanecik konsantrasyonunun düşey yönde zamanla değişebileceği ve reometrede hatalı ölçümlere neden olabileceği dikkate alınmalıdır. Stabil olmayan bir karışımı incelemek ise anlamsızdır (Şekil 3.37).



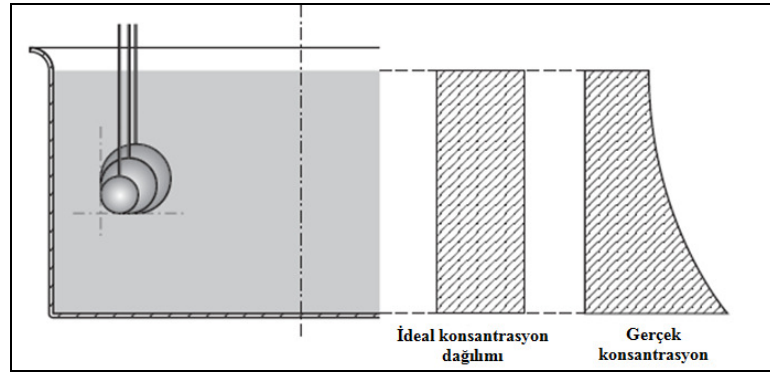
Şekil 3.35 Çimento hamuru, harç ve mikro beton için başlangıç viskozite değerleri (Küçük grafikler EK-C’de verilmiştir).



Şekil 3.36 Harç örneklerinde gözlenen viskozitedeki dalgalanmanın nedeni; a) Çimento hamuru ve mikro betonlar ($d_{maks} < 0,25$ mm) için, b) Çimento harcı içinde sürüklenmeye direnç oluşturan tanecikler (Schatzmann, 2005).

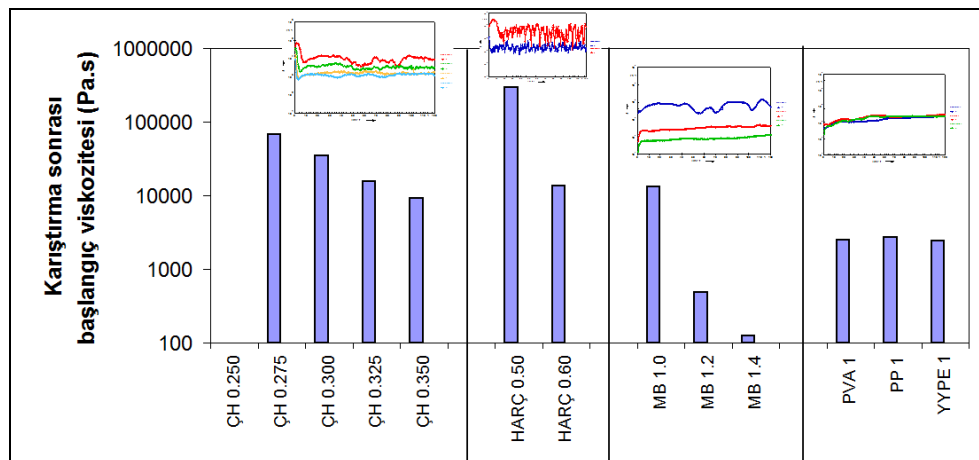
Lifli mikro betonların başlangıç viskoziteleri incelendiğinde, aynı karışımın lifsiz haline (MB 1,2) kıyasla, başlangıç viskozitesinin bir miktar daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 3.35). Ancak bu fark statik EKG değerlerindeki kadar belirgin

değildir. Statik EKG'yi artırma mekanizmalarına benzer şekilde, liflerin bilye etrafında kümelenerek sürüklenmeyi engelleme etkileri başlangıç viskozitesini arttıran temel nedendir.

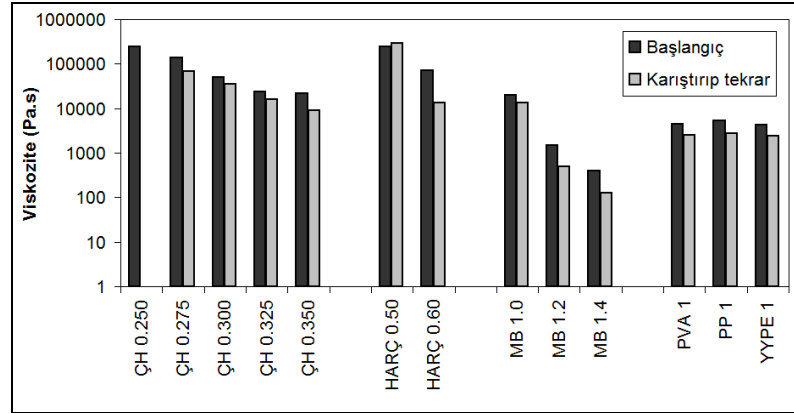


Şekil 3.37 Katkı dozajı veya S/Ç oranı yüksek karışımlarda stabilite kaybı riski (Schatzmann, 2005).

Statik eşik kayma gerilmelerinin tespitinde kullanılan tekrar karıştırma yöntemi, başlangıç viskozitelerinin incelenmesinde de aynen uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.38'de verilmiştir. Genel olarak başlangıç viskozite değerleri de karıştırma sonrasında azalma eğilimindedir. Bu eğilim karşılaştırmalı olarak Şekil 3.39'da verilmiştir. S/Ç oranı 0,50 olan çimento harcı hariç tüm karışımlarda yeniden karıştırma başlangıç viskozitesini bir miktar azaltmıştır.



Şekil 3.38 Çimento hamuru, harç ve mikro beton için tekrar karıştırma sonrası başlangıç viskozite değerleri (Küçük resimler EK-C'de verilmiştir).



Şekil 3.39 Çimento hamuru, harç ve mikro beton için ilk anda ve tekrar karıştırma sonrası başlangıç viskozite değerleri.

3.4.5.3 Statik Reolojik Parametrelerin Birlikte Değerlendirilmesi

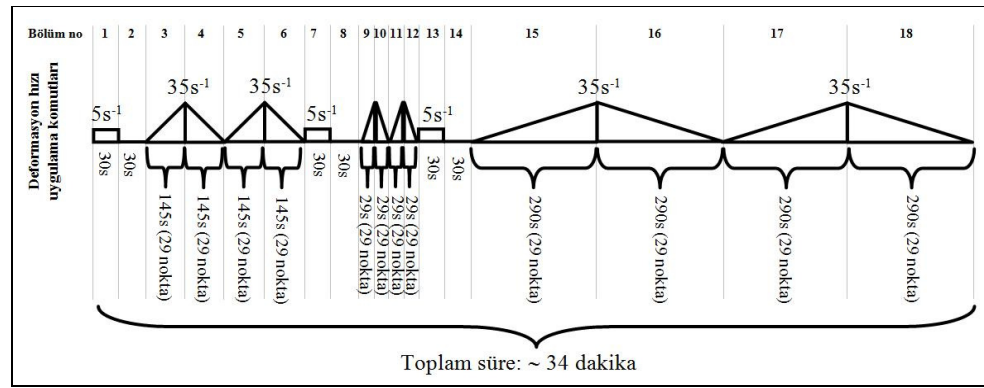
Bu aşamada incelenen karışımların, statik (durgun halden ilk harekete geçiş) haldeki reolojik özellikleri çok düşük deformasyon hızlarında kısa süreli ölçümlerle elde edilmiştir. Reometrelerde ölçülen EKG ve viskozite değerleri, uygulanan deformasyon hızının sınırları, uygulama süresi ve şiddeti ile yakından ilişkilidir (Koehler ve Fowler, 2004). Yüksek bir deformasyon hızında göreceli olarak daha düşük reolojik değerler ölçülecektir. Bu açıdan çok düşük deformasyon hızında yapılan kısa süreli viskozite ölçümlerinde, oldukça yüksek EKG ve başlangıç viskozitesi değerleri elde edilmesi normaldir. Elde edilen sonuçlar mikro beton tasarımlarının uygun akışkanlaştırıcı dozajı kullanılması halinde, başlangıç reolojik özelliklerinin kolay karıştırma ve kolay yerleştirme açısından optimize edilebileceğini göstermektedir. Böylece liflerin işlenebilirliğe olumsuz etkisinin en aza indirgenmesi de mümkün olacaktır.

3.4.6 Akma Eğrilerinin Belirlenmesi

3.4.6.1 Akma Eğrisinin Oluşturulmasında Kullanılan Yöntem

Bir önceki bölümde, karışımların durağan halden harekete geçmesi sırasındaki reolojik özellikleri *çok düşük deformasyon hızlarında* incelenmişti. Bu bölümde ise

farklı ve yüksek deformasyon hızlarında, hareket halindeki davranışları incelenecektir. Bu amaçla “akma eğrileri” elde edilecektir. Akma eğrisi, taze karışımların “deformasyon hızı değişimi ile kayma gerilmesi arasındaki ilişki” ile ifade edilebilir. Bilyenin karışım içinde belli bir hızda sürüklenmesi için gerekli kuvvet, reometre yardımı ile ölçülmekte ve bilyenin dönme merkezine göre momenti hesaplanmaktadır. Dönme hızı ve moment değerleri ampirik katsayılar yardımı ile, deformasyon hızı ve kayma gerilmesi değerlerine dönüştürülmektedir (Schatzmann, 2005). Dönme hızı belli kurallar dahilinde arttırılıp azaltılarak akma eğrisi oluşturulabilir. Tez kapsamında incelenecek karışımların akma eğrilerini çıkartmak için “Rheoplus” yazılımı ile Şekil 3.40’da verilen makro hazırlanmıştır.



Şekil 3.40 Çimento hamuru, mikro beton ve harç karışımlarının akma eğrisi makrosu.

Hazırlanan karışımlar içinde bilye, önce $5s^{-1}$ 'lik sabit bir deformasyon hızında 30 saniye süre ile döndürülmüş ve 30 saniye beklemesi sağlanmıştır. Bu ilk iki aşama ön hazırlık evresi olarak planlanmıştır. Amacı, karışımların hazırlanması ve reometreye taşınıp, reometre haznesine aktarılması esnasında oluşan gerilme geçmişini silmektir. Böylece tiksotropinin başlangıç ölçümlerinde yaratacağı değişkenlik azaltılmış olacaktır (Westerholm, Lagerblad ve Forssberg, 2007). İlk iki aşamadaki davranış bir önceki bölümde incelendiği için, bu aşamalarda veri alınmamıştır. Ön hazırlık evresinden sonra, deformasyon hızı $1s^{-1}$ 'den $35s^{-1}$ 'e her 5 saniyede $1/29$ oranında doğrusal olarak arttırılmış, en yüksek hıza ulaşıldığında, hız yine 5 saniyede $1/29$ oranında doğrusal olarak azaltılmıştır. Ardından aynı işlem tekrarlanmıştır. Böylece dört aşama daha tamamlanmıştır, bu aşamalarda 29'ar adet veri toplanmıştır. İlk altı aşama tamamlandıktan sonra, aynı işlemler daha hızlı bir

deformasyon artışı çevrimi ($1s^{-1}$ 'den $35s^{-1}$ 'e 10 saniyede 1/29 oranında yükseltip aynı oranda alçaltma) ve daha yavaş bir deformasyon artışı çevrimi ($1s^{-1}$ 'den $35s^{-1}$ 'e 10 saniyede 1/29 oranında yükseltip aynı oranda alçaltma) ile tekrarlanmıştır. Toplam 18 aşamadan oluşan program yardımı ile yaklaşık 34 dakikada her bir karışımın akma eğrilerini elde etmek için 348 adet veri toplanmıştır (Şekil 3.40). Bu süre özellikle hidrasyon reaksiyonlarının reolojik davranışa etkisinin ihmal edilebilir düzeylerde olduğu ilk yarım saat içinde tutulmuştur (Jarny ve diğer., 2005).

Yukarıda ayrıntılı olarak açıklanan yöntemin kullanılmasının üç amacı bulunmaktadır:

1. Reometre sisteminin (MCR 51 ve BMS 8) izin verdiği en geniş deformasyon hızı aralığında ($1-35s^{-1}$) farklı karışımların davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Çok sayıda akma eğrisi elde edilip, karışımların reolojik davranışlarını gerçeğe en yakın şekilde modellemek mümkün olmuştur.

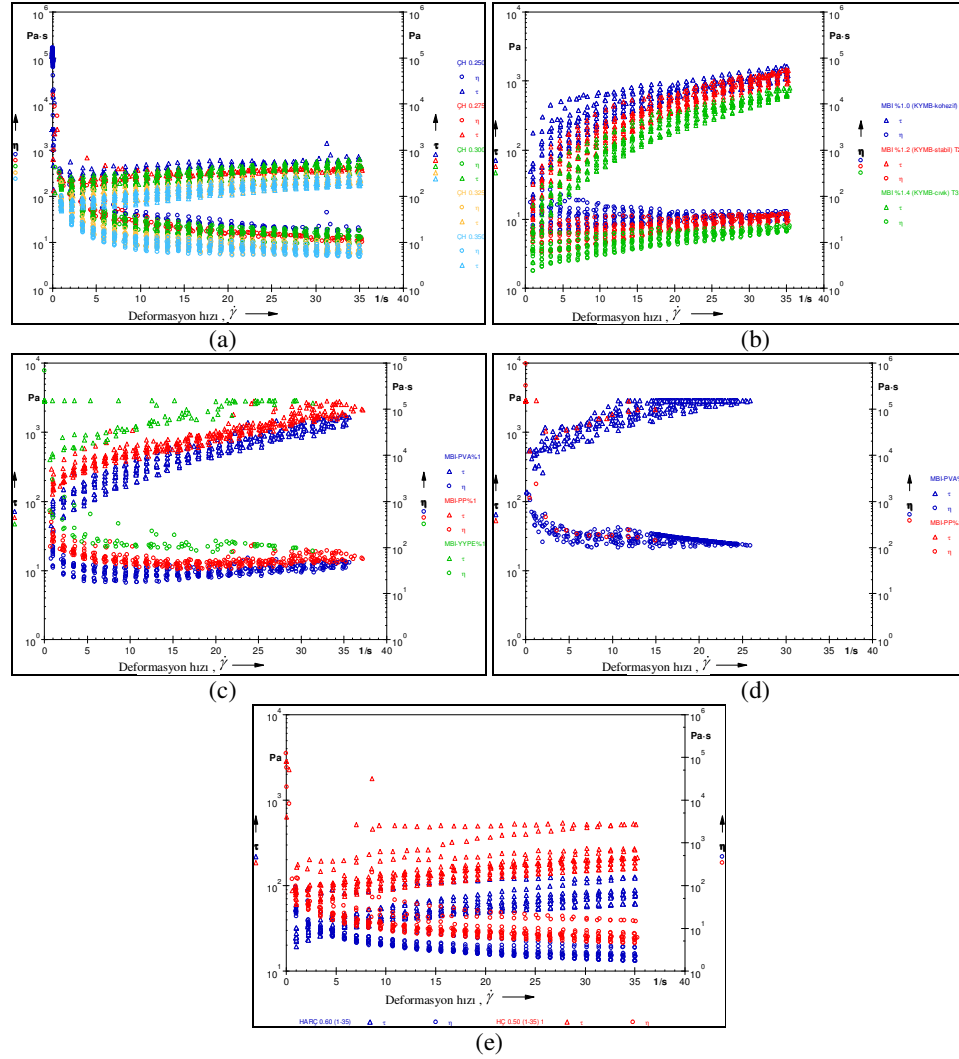
2. Belli bir deformasyon hızına ulaşma süresinin değişiminin (deformasyon hızının ivmelenmesi), akma eğrisine ve incelenen karışımların reolojik özelliklerine etkilerini incelemek amaçlanmıştır. Burada deformasyon hızının $1s^{-1}$ 'den $35s^{-1}$ 'e 29 kademedede 29 saniyede (Bölüm 9-10-11-12), 145 saniyede (Bölüm 3-4-5-6) ve 290 saniyede (Bölüm 15-16-17-18) artması ve geri azalması davranışı değiştirebilmektedir. Deformasyon artışının çok uzun zamanda olması ($29*10s$) tiksotropi etkisinin de ortaya çıkmasına yol açabilirken, çok kısa zamanda ($29*1s$) deformasyonun artması bilyenin hızlı ivmelenme nedeniyle yalpalamasına, dolayısıyla ölçülen değerlerin dalgalanmasına yol açmaktadır. Normal bir deformasyon hızı artış süresi ($29*5s$), deformasyon sertleşmesinin veya yumuşamasının en sağlıklı gözleneceği durum olacaktır.

3. Karışımların deformasyon hızlarının arttırılması ve azaltılması sırasında elde edilen akma eğrileri arasındaki farklılıklardan histeresiz alanlarının belirlenmesi ve farklılıkların karışım özellikleri açısından yorumlanması amaçlanmıştır.

3.4.6.2 Ham Verilerin Toplanması ile İlgili Temel Bilgiler

Deneyler sonucunda elde edilen akma eğrisi ham verileri Şekil 3.41’de toplu halde verilmiştir. Akma eğrisi grafikleri çift y-eksenli çizilmiştir. Grafiklerin soldaki y-ekseninde kayma gerilmesi (Pa), sağdaki y-ekseninde ise anlık viskozite (Pa.s) değerleri görülmektedir. Kayma gerilmesi verileri “üçgen”, viskozite verileri ise “karo” simgesi ile noktalanmıştır. Her iki eksen de logaritmiktir. Zira incelenen karışımlardan, taranan deformasyon hızı aralığında çok farklı kayma gerilmesi ve viskozite değerleri ölçülmektedir. Yatay eksen ise deformasyon hızı değerini $0-35s^{-1}$ aralığında göstermektedir. Tüm ham veriler, seriler için ayrı ayrı gruplandırılrsa da, ham veri sayısının çokluğu sonuçların birkaç grafikte gösterilebilmesini güçleştirmektedir. Bu nedenle her ölçüm aşamasında elde edilen ham veriler, model analizinde kullanılırken ayrı ayrı grafikler halinde sunulacaktır.

Elde edilen ham veriler, bazı karışımlar için deformasyon hızının her zaman hedeflenen değerlere çıkamadığını göstermiştir. Örneğin, S/Ç oranı 0,250 olan çimento hamuru karışımının içinde bilyenin dönmekte çok zorlandığı, bir turunu ancak programın 15. bölümünde tamamlayabildiği, daha sonraki turlarda bilyenin sürüklenme bölgesinden yarılan hamurdan, daha kolay geçtiği ve akma eğrisinin oluşturulduğu gözlenmiştir. Diğer S/Ç oranlarında ise, bilyenin çimento hamuru içinde sürüklenmesinde bir sorun yaşanmamıştır. Benzer durum S/Ç oranı 0,50 olan harç karışımında da yaşanmıştır. Ayrıca özellikle lifli karışımlarda liflerin matrisi tutucu ve bilyenin matris içinde sürüklenmesini engelleyici etkisi, ham verilerden açıkça görülmektedir. Lif dozajının %2 olduğu serilerde uygulanan programın hiçbir aşamasında deformasyon hızı $35s^{-1}$ değerine ulaşamamış, $27 s^{-1}$ ’den geri dönmüştür. Lif dozajının %1 olduğu serilerde de programın ilerleyen aşamalarında sınır momente karşılık gelen kayma gerilmesi limitine (2850 Pa) ulaşıldığı için, tüm akma eğrileri tamamlanamamıştır. Liflerin fiziksel özelliklerine bağlı olarak “*dinamik reolojik parametrelerin*” ölçülmesinde de sorunlara yol açtığı gözlenmiştir. İlerleyen bölümlerde bu konuya tekrar dönülecektir.



Şekil 3.41 Akma eğrileri için elde edilen ham veriler; a) Çimento hamuru serisi, b) Lifsiz mikro beton serisi, c) Lifli (%1) mikro beton serisi, d) Lifli (%2) mikro beton serisi, e) Harç serisi.

3.4.6.3 Ham Verilerin İşlenmesi ve Reolojik Modelleme

Ham verilerin elde edilmesi ile ilgili olarak verilen ön bilgilerden sonra, bu verilerin işlenmesine geçilecektir. Farklı reolojik modellerin (Bingham, Herschel Bulkley, Casson, Quemada, Papo ve Piani modeli vb.) elde edilen verilere uygulanması sonucu Herschel Bulkley modelinin çimento hamurları, mikro betonlar ve harç için davranışı modellemede oldukça uygun olduğu belirlenmiştir. Bazı araştırmacılar modellemede Bingham modelini kullanmaktadır (Banfill ve Frias,

2007, Azeredo, Morel ve Lamarque, 2008). Bingham modelinde viskozitenin deformasyon hızı değişimlerinden etkilenmediği kabul edilmektedir. Bazı malzemelerde viskozite deformasyon hızından etkilenmezken, bazılarında değişiklik olabilir. Banfill ve Frias (2007) ile Azeredo ve diğerlerinin (2008) çalışmalarından elde ettikleri akma eğrileri ve analiz modelleri Şekil 3.42’de verilmiştir. Söz konusu çalışmalarda kullanılan malzemelerin, reometre sistemlerinin ve uyguladıkları deformasyon hızı prosedürlerinin farklılığı nedeniyle, her çalışma sonucu kendi içinde değerlendirilmelidir. Ancak genel olarak değişken viskoziteli karışımlar için Bingham modelinin davranışı temsil etmede yetersiz kalacağı söylenebilir. Ayrıca karışımların özelliklerine bağlı olarak, *eşik kayma gerilmelerinin* tespitinde de, uygulanan model yardımıyla bulunan ve pratikte ölçüm sonucu bulunan değerler arasında farklılıklar olmaktadır (Şekil 3.42). Herschel Bulkley (HB) modeli akıcı kıvamlı kil gibi süspansiyonların reolojik modellenmesinde sıkça kullanılmaktadır (Besq, Malfoy, Pantet, Monnet ve Righi, 2003). Bu model, hem Bingham modelini kendi bünyesinde kapsamakta, hem de deformasyon yumuşaması veya sertleşmesi gösteren karışımları modellemeye imkan sağlamaktadır. Kendiliğinden yerleşen özellikteki malzemelerin modellenmesinde de uygun bir modeldir (Ferraris, 1999a). Bu model her akma eğrisi için regresyon analizinde kullanılmıştır:

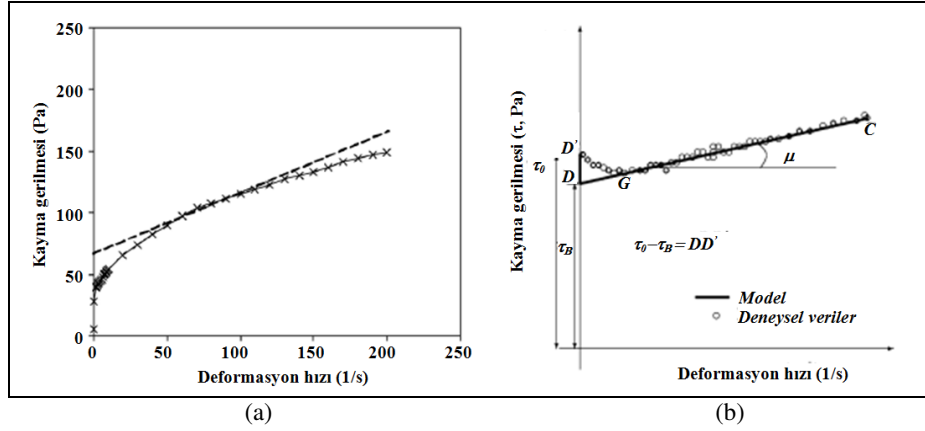
$$y = a + bx^p \quad (3.3)$$

$$\tau = \tau_{o,dinamik} + b\dot{\gamma}^p \quad (3.4)$$

Herschel Bulkley modelinde τ : Belli bir deformasyon hızındaki kayma gerilmesi (Pa), τ_o : Dinamik EKG (Pa), $\dot{\gamma}$: Deformasyon hızı (1/s), b ve p: model katsayıları’dır. Model katsayılarından p, karışımların viskozitesinin deformasyon hızından nasıl etkilendiğini göstermektedir. $p>1$ olması durumunda deformasyon sertleşmesi, $p<1$ olması durumunda ise deformasyon yumuşaması davranışı baskındır. $p=1$ durumunda ise viskozite deformasyon hızından bağımsız olarak sabit bir değer almaktadır. Bu durumdaki karışım, Bingham modeline uymakta olup, karışımın sabit olan viskozitesi “plastik viskozite (μ)” olarak adlandırılmaktadır (Koehler ve Fowler, 2004). Ancak çoğunlukla viskozite, deformasyon hızı ile

değişmektedir. Herschel Bulkley modelinde deformasyon hızının sonsuz değerinde, viskozitenin sabitlendiği (η_{inf}) kabulü ile plastik viskozite şu şekilde tanımlanır:

$$\eta_{inf} = \mu = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \frac{\partial \tau}{\partial \dot{\gamma}} \quad (3.5)$$

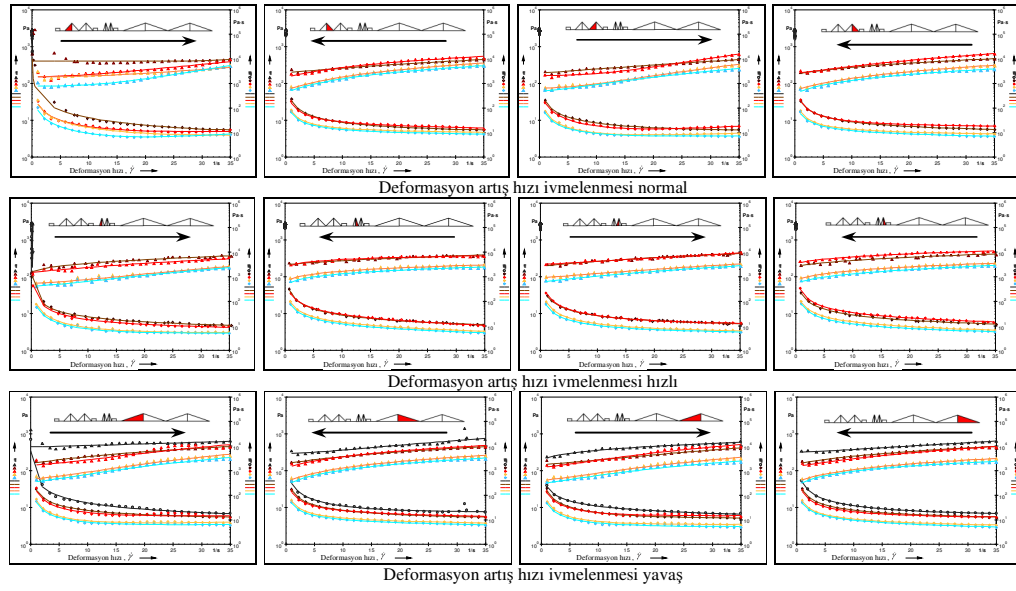


Şekil 3.42 Farklı araştırmacıların elde ettikleri akma eğrileri ve bu eğrilere uygun model kabulleri, a) Banfill ve Frias (2007), b) Azeredo ve diğer. (2008).

3.4.6.4 Dinamik Reolojik Parametrelerin Akma Eğrisi Yardımıyla Tespiti

Bu bölümde regresyon analizi sonucu elde edilen akma eğrisi modelleri kullanılarak, sırasıyla çimento hamuru serisi, lifsiz ve lifli mikro beton serilerinin ve son olarak harçların eşik kayma gerilmesi ve nihai viskozite değerleri sunulacaktır. Elde edilen sonuçlar farklı seriler için birbiri ile karşılaştırılarak tasarımlar arasındaki reolojik farklılıklar yorumlanacaktır.

3.4.6.4.1 Çimento Hamuru Serisi. Çimento hamuru karışımları için Herschel Bulkley modeli analiz sonuçları Şekil 3.43'deki grafiklerde sunulmuştur. Noktalar ham verileri gösterirken, noktalar üzerinden geçen eğriler modeli simgelemektedir. Deneyin tüm aşamalarında deformasyon hızı artış ve azalış süresinden bağımsız olarak çimento hamurlarının viskozite değerleri deformasyon hızı artışı ile azalmakta, karışımlar “deformasyon yumuşaması” davranışı göstermektedir.



Şekil 3.43 Çimento hamuru karışımlarının Herschel Bulkley model eğrileri, (S/Ç=0,250 siyah, 0,275 kahverengi, 0,300 kırmızı, 0,325 sarı, 0,350 mavi).

Herschel Bulkley modeli analiz sonucu her model için eğrinin y-eksenini kestiği nokta “dinamik eşik kayma gerilmesi $\tau_{o,dinamik}$ ” olarak tanımlanmıştır. Bu değer bir önceki bölümde bulunan statik EKG değerinden farklıdır. Doğrudan verilerden değil, modelden alınan bir büyüklüktür. Ayrıca hareket halindeki durum için teorik bir büyüklüktür. Her bir eğrinin analizi sonucu elde edilen dinamik EKG ($\tau_{o,dinamik}$) değerleri Tablo 3.11’de listelenmiştir. S/Ç oranı en fazla olan çimento hamuru karışımında bile, belli bir dinamik eşik kayma gerilmesi değeri olduğu görülmektedir. Tablo 3.11’den bazı karışımlarda deformasyon hızı ivmelenmesi arttıkça, dinamik EKG değerlerinin arttığı görülmektedir. Diğer taraftan, çimento hamurlarının S/Ç oranı artışı ile dinamik EKG değerleri azalmaktadır. Ancak bu azalma doğrusal değildir.

Deneyin ilk aşamalarında S/Ç oranı 0,250 ve 0,275 olan karışımlarda başlangıçtaki ölçüm noktalarının modelden sapma gösterdiği, ancak daha sonra modelin bu noktalara oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu durum düşük S/Ç

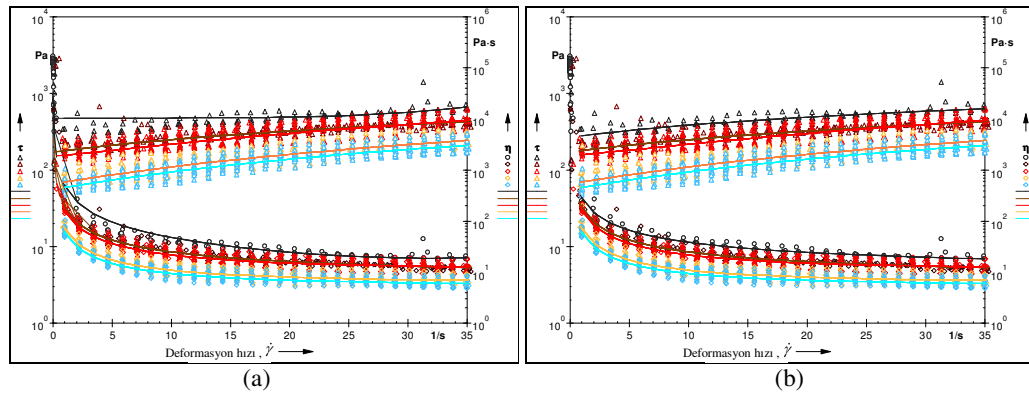
oranlı çimento hamurlarının içine gömülü bilyenin, düşük deformasyon hızlarında harekete geçirilmesi için gerekli kuvvetin büyüklüğünden kaynaklanmaktadır. S/Ç oranı düşük olan çimento hamurlarında başlangıçta ölçülen kayma gerilmesi değeri 2850Pa'ın üzerine çıkmaktadır. Diğer bir deyişle ilk anda bu karışım için eşik kayma gerilmesi 2850 Pa'ın üzerindedir.

Tablo 3.11 Çimento hamurlarının HB analizi ile bulunan $\tau_{o,dinamik}$ değerleri (Pa).

S/Ç oranı	3. bölüm	4. bölüm	5. bölüm	6. bölüm	9	10	11	12	15	16	17	18
	Deformasyon artış hızı ivmelenmesi normal				Deformasyon artış hızı ivmelenmesi hızlı				Deformasyon artış hızı ivmelenmesi yavaş			
	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)
0,250	1909	>2850	>2850	>2850	308	>2850	>2850	>2850	446	293	190	315
0,275	400	197	193	175	135	209	189	185	156	154	149	150
0,300	152	141	166	190	129	67	217	215	142	114	123	131
0,325	151	66	75	64	67	61	94	72	60	48	55	47
0,350	85	55	62	49	56	49	71	65	49	37	45	34

S/Ç oranı 0,250 olan karışım incelenirken, ilk 12 aşamada hedeflenen deformasyonlara ulaşılamadığı, bilyenin karışım içinde sürüklenmekte çok zorlandığı görülmüştür (siyah renkli noktalar ve eğri). Ancak sürekli uygulanan 2850 Pa ile reometre haznesinde yavaş da olsa ilerleyen bilye, bir turunu tamamladığında çimento hamuru içindeki hareket bölgesini yumuşattığından, sürüklenme sırasında maruz kaldığı kayma gerilmesi değerleri 2850 Pa'ın altına inmektedir. Bu aşamadan sonra daha düşük eşik kayma gerilmesi değerleri okunmaktadır. Bu nedenle S/Ç oranı 0,250 olan karışım için ilk sekiz grafikte analiz çok dar bir deformasyon hızı aralığında gerçekleşmiştir ($<1s^{-1}$). Ancak bilye bir turunu tamamlayınca (15. bölümden sonra) farklı deformasyon hızlarında veri alınmaya başlanmıştır. Bu aşamadan önceki veriler de dikkate alınarak, Herschel Bulkley akma eğrisi modelleri birlikte çizilirse Şekil 3.44a'daki, dikkate alınmazsa Şekil 3.44b'deki grafikler elde edilmektedir. Diğer karışımlarda bir değişiklik olmazken, S/Ç oranı 0,250 olan karışımda eşik kayma gerilmesi, başlangıçtaki noktaların da (deformasyon hızı $1s^{-1}$ 'den küçük olan veriler) modele katılımı ile bir miktar yükselmektedir. Tüm durumların ortalaması dikkate alınarak hazırlanan eğrilerden okunan dinamik EKG değerleri Tablo 3.12'de verilmiştir. Sadece S/Ç=0,250 olan seride, Rheoplus yazılımı en uygun eğriyi belirlerken tüm noktaları dikkate aldığı zaman, başlangıçta okunan kayma gerilmesi ile modelden elde edilen kayma gerilmesi arasında fark

bulunmaktadır (Şekil 3.43 sol üst köşedeki grafik). Banfill ve Frias (2007) da model ile belirlenen eşik kayma gerilmesi ile ölçülen kayma gerilmesi arasındaki farklılığı tespit etmiştir. Bu farklılık özellikle kuru kıvamlı tasarımlarda ve ilk ölçümlerde daha belirgindir. Çünkü karışımın kararlı kıvama ulaşması zaman almaktadır, hatta kuru kıvamlı karışımlarda özellikle düşük deformasyon hızlarında kararlı kıvama hiçbir zaman ulaşamayabilir.



Şekil 3.44 Tüm deformasyon hızı ivmelenme koşullarının birlikte değerlendirilmesi ile elde edilen akma eğrileri, a) Deformasyon hızı 1 s^{-1} 'den düşük noktalar dahil edilirse, b) def. hızı 1 s^{-1} 'den düşük noktalar dikkate alınmazsa.

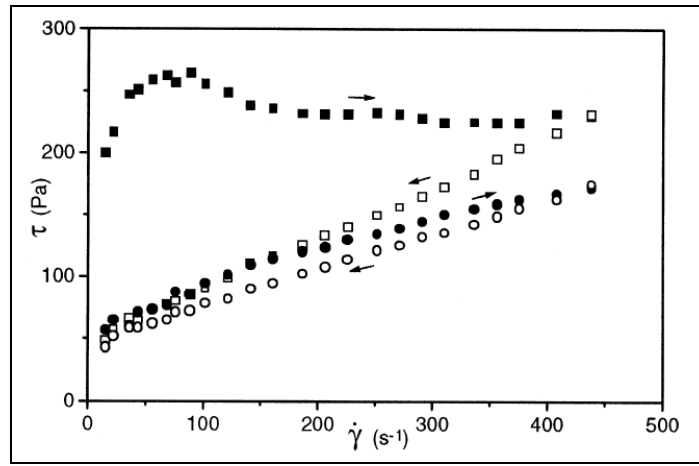
Tablo 3.12 Çimento hamurlarının HB analizi ile bulunan ortalama $\tau_{o,dinamik}$ değerleri (Pa).

S/Ç oranı	$\tau_{o,dinamik}$ (Pa) Kısıtsız ortalama	$\tau_{o,dinamik}$ (Pa) Kısıtlı ortalama
0,250	477*	263**
0,275	169*	171**
0,300	152*	155**
0,325	67	67
0,350	56	56

* Deformasyon hızı 1 s^{-1} 'den düşük noktalar dahil edilirse, ** Deformasyon hızı 1 s^{-1} 'den düşük noktalar dikkate alınmazsa.

Bilyeli yöntemle elde edilen sonuçların yorumlanması amacıyla, çimento hamurunun çift silindirli bir reometre ($R_{iç}=18,4\text{ mm}$; $R_{dış}=21\text{ mm}$; $h=60\text{ mm}$) yardımı ile, akma eğrisinin çıkartıldığı çalışmalarda izlenen yöntem ve elde edilen grafik kısaca özetlenecektir. Bu reometrede iç silindir hareketli olup, deformasyon hızı 450 s^{-1} 'e kadar çıkartılabilmektedir. Silindirin kendi eksenini etrafında dönmesi bilyeli reometreye kıyasla çok daha hızlı olduğu için daha yüksek deformasyon hızlarına ulaşmak mümkündür. Papo ve Piani (2004), S/Ç oranı 0,32 olan çimento hamuru için

Şekil 3.45'te verilen akma eğrisini elde etmiştir. Uygulanan deformasyon hızı prosedürü dört kademedan oluşmaktadır. İlk kademedeki deformasyon hızı $7,31\text{ s}^{-1}$ 'den 439 s^{-1} 'e çıkartılmaktadır. Bu ilk çıkışta eğri, Şekil 3.45'te görüldüğü gibi, yüksek bir kayma gerilmesi değerinden başlamış ve kayma gerilmesi dalgalanarak bir pik yapıp azalmıştır. İkinci kademedeki deformasyon hızı azaltılarak dönüş eğrisi elde edilmiştir. Üçüncü ve dördüncü kademelerde aynı prosedür tekrarlanmıştır. Araştırmacılar reolojik analizde, doğrusallaşan ikinci dönüş eğrisini kullanmıştır. Eşik kayma gerilmesi 50 Pa, plastik viskozite ise 0,23 Pa.s olarak belirlenmiştir (Papo ve Piani, 2004).



Şekil 3.45 Çift silindirli bir reometre ile elde edilen akma eğrileri ($S/C=0,32$ çimento hamuru), (Papo ve Piani, 2004).

Bu tezde, Şekil 3.45'de görülen Papo ve Piani (2004)'nin çalışmasından farklı bir çimento kullanılmasına rağmen, S/C oranı 0,325 olan çimento hamurunun bilyeli reometre ile eşik kayma gerilmesi değeri 67 Pa olarak ölçülmüştür (Tablo 3.12). Bu sonuç, benzer S/C oranlarındaki çimento hamurları için mertebe olarak yakın değerler elde edilebileceğini göstermektedir. Diğer taraftan ilerleyen paragraflarda incelenecek olan plastik viskozite değerlerinin, bilyeli reometre ile ölçülenden çok farklı olduğu tespit edilmiştir. Bu farklılık çift silindirli reometrelerdeki kayma (slip) probleminden kaynaklanmaktadır (Walleik, 2006). Plastik viskozite değerlerinde 100-1000 kata kadar farklılık yaratan kayma (slip) olayının viskoziteyi düşürücü etkisi, süspansiyonların silindir formdaki reometrelerde test edilmesinde ortaya çıkmaktadır.

Karışımların dinamik EKG değerlerinin yanında “viskozite değerleri” de akma eğrisi yardımıyla elde edilmektedir. Hemen hemen tüm çimento hamuru karışımlarında, deformasyon hızı artışı ile nihai viskozitenin (η_{inf}) azaldığı söylenebilir. Uygulanan en yüksek deformasyon hızında ($35s^{-1}$) çoğu karışım için viskozite değeri yataylaşmakta, neredeyse sabit bir değer almaktadır. Bu değer karışımın plastik viskozitesi (μ) olarak kabul edilmiştir. Karışımların nihai viskozite değerleri Tablo 3.13’de listelenmiştir. S/Ç oranı 0,250 olan karışımda, deformasyon hızları uygulanan yöntemin ilk aşamalarında artmadığı için; her aşamadaki viskozite değeri ulaşılabilen deformasyon hızları için verilmiştir. Uygulanan küçük programın (makro) 15. aşamasında, bilyenin bir turu tamamlaması ile birlikte deformasyon hızı $35s^{-1}$ ’e çıkartılabilmektedir. Bu davranışın görüldüğü aşamalarda, en yüksek deformasyon hızındaki viskozite değerleri Tablo 3.13’e işlenmiş ve bu karışımlar “*” simgesi ile işaretlenmiştir. Tablo 3.14’te ise, farklı deformasyon ivmelenmesi değerlerinde elde edilen ortalama nihai viskozite değerleri, S/Ç oranına göre sıralanmıştır. Genel olarak tüm çimento hamuru serilerinde S/Ç oranı artışı ile viskozite azalmaktadır. S/Ç oranı 0,275 ve üzerindeki karışımlarda nihai viskozite çok düşük değerlerdedir. Ayrıca S/Ç oranı 0,275 ve üzerindeki örneklerde, nihai viskozite değerleri, deformasyon hızı ivmelenme farklılığından bağımsız olarak birbirine çok yakın değerler almaktadır. Bu durum çimento hamurlarının yüksek deformasyon hızlarında bilyenin hamur içinde kolayca sürüklenmesine izin verdiğinin bir göstergesidir. Bilye çimento hamuru içinde rahatlıkla kayarak ilerlemektedir. Bu durum yüksek S/Ç oranlı bir çimento hamuru karışımı içinde agreganın ilerlemesine benzetilecek olursa, böyle bir karışımın ayrışma potansiyelinin ne derece yüksek olduğu ortadadır. Pompalama gibi yüksek deformasyon hızlarının hakim olduğu durumlarda, yüksek S/Ç oranlı çimento hamurundan agreganın ayrışma potansiyelinin daha da artacağı söylenebilir.

Sonuç olarak farklı kıvamlardaki çimento hamurlarının dinamik reolojik özellikleri sayısallaştırılmıştır. Çimento hamurlarının S/Ç oranına bağlı olarak dinamik eşik kayma gerilmesinin yüksek (56-477 Pa), nihai viskozitesinin düşük (6-19 Pa.s) olduğu görülmüştür. Çimento hamurlarının S/Ç oranına bağlı olarak hareket halinde ayrışmaya eğilimli, durgun halde ise akmaya dirençli olduğu

söylenbilir. Buradan sonra mikro beton karışımlarının davranışları incelenecek ve çimento hamuru ile karşılaştırılacaktır.

Tablo 3.13 Çimento hamurlarının nihai viskozite (η_{inf}) değerleri (Pa.s).

S/Ç oranı	3. bölüm	4. bölüm	5. bölüm	6. bölüm	9	10	11	12	15	16	17	18
	Deformasyon artış hızı ivmelenmesi normal				Deformasyon artış hızı ivmelenmesi hızlı				Deformasyon artış hızı ivmelenmesi yavaş			
	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)
0,250	43400*	87000*	94000*	64000*	2540*	90100*	79000*	81300*	18	22	17	18
0,275	13	13	13	14	10	11	12	12	13	13	12	13
0,300	11	16	18	19	9	11	13	15	15	14	15	13
0,325	8	10	9	9	5	6	6	7	8	7	7	6
0,350	9	9	7	7	5	5	6	6	7	6	5	5

* S/Ç oranı 0,250 olan karışımda bilyanın bir turu tamamlaması sırasında viskozite değerinin alındığı en büyük deformasyon hızı değerleri 0,05-0,15 s⁻¹'dir.

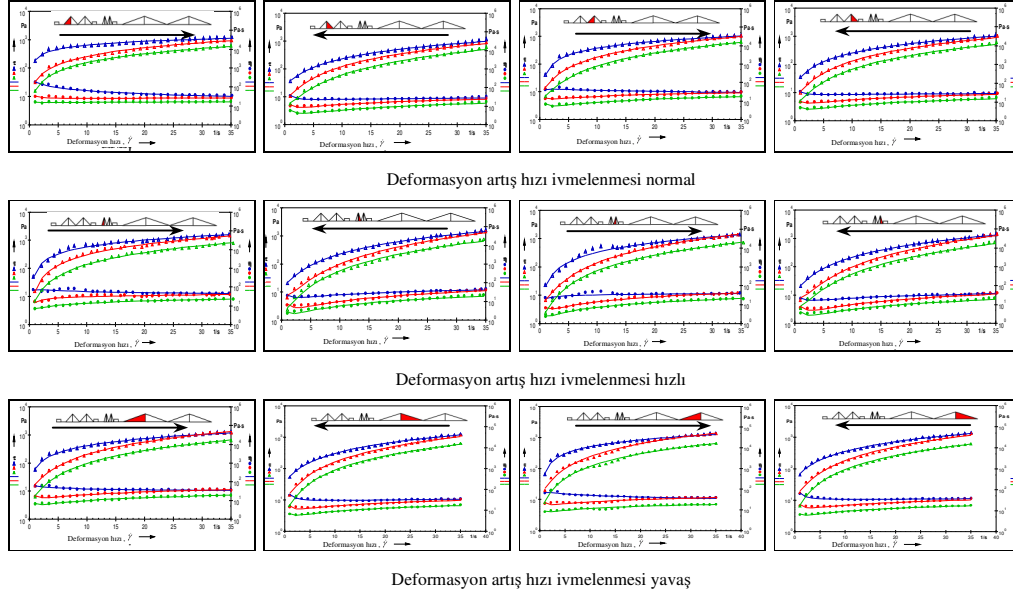
Tablo 3.14 Çimento hamurlarının Herschel Bulkley Modeli'ne göre bulunan nihai viskozite (η_{inf}) değerleri (Pa.s).

S/Ç oranı	η_{inf} Kısıtlı ortalama	η_{inf} Kısıtsız ortalama
0,250	323*-18*	28300**-19**
0,275	12	12
0,300	13	13
0,325	7	7
0,350	6	6

* S/Ç oranı 0,250 olan çimento hamuru karışımı için başlangıçtaki veriler (deformasyon hızı 1s⁻¹'den küçük olan veriler), model analizinde dikkate alınmazsa elde edilen başlangıç ve nihai viskozite değeri.

** S/Ç oranı 0,250 olan çimento hamuru karışımı için başlangıçtaki veriler (deformasyon hızı 1s⁻¹'den küçük olan veriler), model analizinde dikkate alınırsa elde edilen başlangıç ve nihai viskozite değeri.

3.4.6.4.2 Lifsiz Mikro Beton Serisi. Lifsiz mikro beton serilerinde akışkanlaştırıcı katkı dozajı sırasıyla %1,0 (kohezif MB), %1,2 (stabil KYMB) ve %1,4 (cıvık KYMB) olan karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışımların akma eğrileri her aşama için ayrı ayrı HB modeli ile elde edilmiş ve grafikler Şekil 3.46'da sunulmuştur. HB modeli uygulanan örneklerden hesaplanan dinamik EKG değerleri ($\tau_{o,dinamik}$), çoğunlukla katkı dozajı artışı ile azalırken, bazı örneklerde negatif $\tau_{o,dinamik}$ değerleri elde edilmiştir.



Şekil 3.46 Lifsiz mikro beton karışımlarının Herschel Bulkley model eğrileri, (MB 1,0 mavi, MB 1,2 kırmızı, MB 1,4 yeşil).

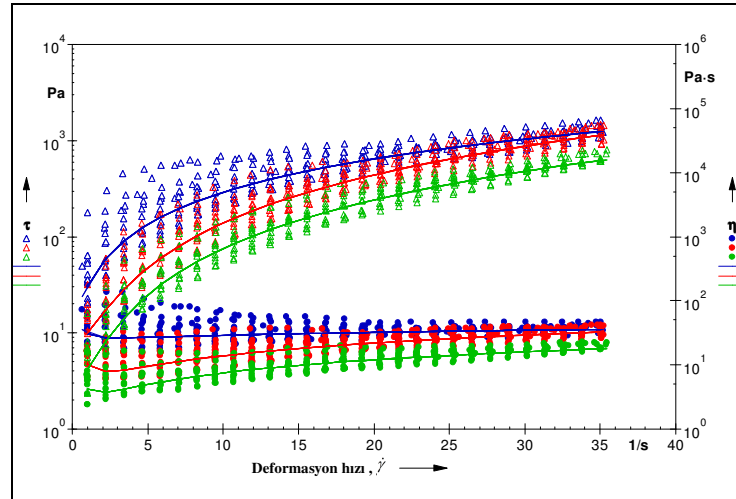
Tablo 3.15’de $\tau_{o,dinamik}$ değerleri listelenmiştir. Negatif $\tau_{o,dinamik}$ değerleri fiziksel olarak anlamsız olduğu için, bu durumdaki örneklerde eşik kayma gerilmesi değeri modelden elde edilememektedir. Diğer bir deyişle, bu karışımların harekete geçmesi için gerekli ön gerilme değeri çok düşük olduğu için modelden belirlenmemektedir. Bu örneklerde tamamen Newtonyen olmayan süspansiyon davranışı görüldüğü söylenebilir. Hareketli durumda dinamik EKG değeri neredeyse sıfırlanmıştır. Bir önceki bölümde incelenen çimento hamuru (ÇH) serileri ile karşılaştırıldığında (Tablo 3.11, 3.12) $\tau_{o,dinamik}$ değerlerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. ÇH serisinde tüm durumlar dikkate alındığında, en düşük $\tau_{o,dinamik}$ değeri 34 Pa iken kendiliğinden yerleşen MB serilerinde (MB1,2, MB1,4) $\tau_{o,dinamik}$ değeri çoğunlukla 15 Pa’nın altındadır. Aradaki fark *kendiliğinden yerleşebilirliğin ilk şartı olan düşük EKG hedefinin bu karışımlarda sağlandığını açıkça göstermektedir*. Bazı örneklerde EKG değerinin sıfıra çok yakın olması, karışımın kendi ağırlığı ile kolayca akmaya başlayacağını göstergesidir. Farklı deformasyon hızı ivmelenmelerinde, elde edilen verilerin tümü kullanılarak yapılan HB analizinde elde edilen eğriler Şekil 3.47’de verilmiştir. Bu eğrilerden okunan $\tau_{o,dinamik}$ değerleri de Tablo 3.15’in son sütununda

görülebilmektedir. Ortalama $\tau_{o,dinamik}$ değerleri mikro betonlar için 3-13 Pa iken, çimento hamurlarında bu değer 56-477 Pa arasında değişmektedir (Tablo 3.11, 3.12 ve 3.15).

Tablo 3.15 Lifsiz mikro betonların HB'ye göre bulunan $\tau_{o,dinamik}$ değerleri (Pa).

Mikro beton	3. bölüm	4. bölüm	5. bölüm	6. bölüm	9	10	11	12	15	16	17	18	ortalama	
	Deformasyon artış hızı ivmelenmesi normal				Deformasyon artış hızı ivmelenmesi hızlı				Deformasyon artış hızı ivmelenmesi yavaş					(Pa)
	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)		
MB 1,0	-*	25	-*	17	-*	16	-*	15	3	40	-*	47	13	
MB 1,2	11	8	7	8	-*	7	5	7	12	12	14	15	8	
MB 1,4	2	5	5	4	2	2	2	4	4	5	4	4	3	

* HB model analizi sonucu ekg değeri negatif çıkan karışımlardır. Fiziksel olarak EKG'nin alabileceği en küçük değer 0 olduğu için bu karışımlarda EKG 0 alınabilir.



Şekil 3.47 Lifsiz mikro beton karışımlarının Herschel Bulkley model eğrileri (Tüm deformasyon hızı değişimleri birlikte kullanılarak), (MB 1,0 mavi, MB 1,2 kırmızı, MB 1,4 yeşil).

Mikro betonların viskozitelerinin deformasyon hızına bağlı olarak değişimi de akma eğrileri yardımıyla incelenmiştir (Şekil 3.46). Bu eğrilerden mikro beton serisi karışımların çimento hamurlarından önemli bir farklılığı tespit edilmiştir. Çimento hamuru serilerinin hemen hemen tümünde deformasyon hızı artışı ile viskozite değeri azalırken, mikro beton serilerinde deformasyon hızı artışı ile viskozitenin *artma veya azalma eğiliminde olabileceği* görülmüştür. Bu farklılık viskozitenin başlangıç değerine ve dolayısıyla bu değeri etkileyen akışkanlaştırıcı katkı dozajına bağlıdır.

Akışkanlaştırıcı katkı dozajı düşük olan, kohezif MB karışımı başlangıçta yüksek viskoziteli iken, deformasyon hızı artışı ile yumuşama (viskozite düşüşü, pseudoplastik) göstermektedir. Bu durum çimento hamuru serileri ile benzerlik göstermektedir. Diğer taraftan, akışkanlaştırıcı katkı dozajı artırılan KYMB karışımında ise, başlangıçta göreceli olarak daha düşük olan viskozite, deformasyon hızı artışı ile yükselmekte, deformasyon sertleşmesi (shear thickening) davranışı ortaya çıkmaktadır. Literatürde de “*kendiliğinden yerleşen betonun hamur fazını*” inceleyen araştırmacılar aynı davranıştan söz etmektedir (Mouret ve Cyr, 2003). Katkı dozajı %1,2 olan seride ise her iki durum da gözlenebilmektedir. Bu durum, deformasyon hızı artış ve azalış sürelerinin değişkenliğinden bağımsız olarak tüm mikro beton serilerinde görülmektedir (Şekil 3.46). Benzer davranış, literatürde farklı kökenli akışkanlaştırıcı katkı içeren çimento hamurlarında da gözlenmiştir. Örneğin naftalin formaldehit kökenli katkının belli bir dozajın üzerinde kullanımı ile, katkılı çimento hamuru davranışının pseudoplastik’ten dilatant’a dönüştüğü rapor edilmiştir (Papo ve Piani, 2004). Söz konusu davranış değişimi polimer kökenli katkıların taze karışımda çift yönlü etki mekanizmaları ile açıklanabilir. İster suda çözünebilir olsun, ister olmasın polimer kökenli katkı ilavesi taneler arasındaki sürtünmeyi azaltıcı bir rol üstlenmektedir. Bu rol hidrodinamik kaydırıcılık (hydrodynamic lubrication) olarak adlandırılmaktadır. Bünyesinde katı tanecikler içeren bir süspansiyona polimer ilave edildiği düşünölsün. Polimer bünyesine eklendiği süspansiyonun sıvı fazının viskozitesini (*interstitial viscosity*) arttırmasına rağmen, *hidrodinamik kaydırıcılık rolü nedeniyle süspansiyonun viskozitesini düşürebilir*. Çünkü katı tanecikler arasındaki sürtünmeyi azaltmaktadır. Yüksek deformasyon hızlarında polimer, katı tanecikler arasındaki sürtünmeyi azaltıcı etkisini kaybederse, süspansiyonun sıvı fazının viskoziteyi arttırıcı etkisi baskınlaşır ve deformasyon sertleşmesi davranışı ortaya çıkar (Lombois-Burger, ve diğer., 2006).

Viskozite eğrilerinden göröleceği üzere, viskozite değeri yüksek deformasyon hızlarında ($35s^{-1}$) yataylaşmaktadır. Eğrilerden tespit edilen nihai viskozite (η_{inf}) değeri Tablo 3.16’da tüm durumlar için listelenmiştir. Ayrıca farklı deformasyon hızı ivmelerindeki değeri bir araya getirilerek yapılan analiz verileri Tablo 3.16’nın son sütununda görölebilir (Şekil 3.47). *Mikro betonlarda elde edilen nihai viskozite*

değerleri, çimento hamuru (ÇH) karışımlarından daha yüksektir (ÇH 0,250 hariç). Mikro betonlarda kullanılan polikarboksilat kökenli akışkanlaştırıcı katkı dinamik EKG'yi düşürürken, nihai viskoziteyi (η_{inf}) yüksek deformasyon hızlarında bile yüksek tutmaktadır. Bu durum, hareket halindeki mikro beton bileşenlerinin (çimento, kireçtaşı tozu) birbiri ile bağlantılı olduğu izlenimini uyandırmaktadır. Akışkanlaştırıcı katkı, hareket halindeki tanecikler arasında köprüleme görevi üstlenerek, bilyenin kolayca sürüklenmesini engellemektedir. Mikro beton yüksek deformasyon hızlarında (pompalama gibi) stabilite açısından katkısız çimento hamuruna kıyasla avantaj sağlamaktadır. Uygun dozaj aralıklarında çalışılırsa *kendiliğinden yerleşebilirliğin ikinci şartı olan uygun plastik viskozite* sağlanmış olacaktır. Plastik viskozite, çok düşük olursa ayrışma, çok yüksek olursa tıkanma, aşırı yavaşlama sorunları ortaya çıkar.

Tablo 3.16 Lifsiz mikro betonların HB'ye göre bulunan nihai viskozite (η_{inf}) değerleri (Pa.s).

Mikro beton	3. bölüm	4. bölüm	5. bölüm	6. bölüm	9	10	11	12	15	16	17	18	ortalama
	Deformasyon artış hızı ivmelenmesi normal				Deformasyon artış hızı ivmelenmesi hızlı				Deformasyon artış hızı ivmelenmesi yavaş				(Pa.s)
	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	
MB 1,0	32	28	29	29	45	42	39	38	34	34	36	37	41
MB 1,2	26	24	28	26	40	37	42	36	38	30	39	33	31
MB 1,4	17	14	18	15	23	19	21	18	19	17	18	17	20

* Nihai viskozite (η_{inf}) değeri, en büyük deformasyon hızında elde edilen anlık viskozite değeridir.

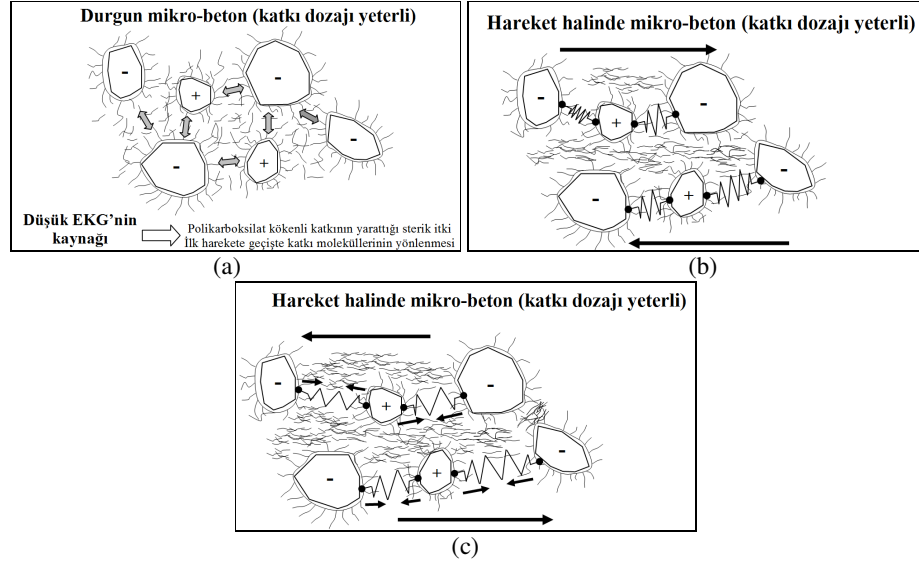
Kohezif karışımlarda (MB 1,0) deformasyon hızı artışı ile viskozite azalırken, cıvık karışımlarda ise (MB 1,4) deformasyon hızı artışı ile viskozite artmaktadır (Şekil 3.46-3.47). Katkı dozajı düşük olan mikro betonda çimento hamuruna benzer bir davranış gözlenmekte, tanecikler arası bağ için yeterli katkı bulunmamaktadır. Bu nedenle yüksek deformasyon hızlarında viskozitede düşme meydana gelmektedir. Ancak her iki uç durum da sorunludur. İlk durumdaki düşük deformasyon hızlarında viskozite aşırı yükseleceğinden akamama sorunu, ikinci durumda ise düşük deformasyon hızlarında viskozite aşırı düşebileceğinden çökme-ayrışma riski ortaya çıkabilir. Bu durum da *kendiliğinden yerleşebilirliğin üçüncü şartı olan stabilite* için katkı dozajının %1,2 olması en avantajlı durum olacaktır. İleride lif

ilave edilecek en uygun matris için uygun akışkanlaştırıcı katkı dozajı seçiminde, böyle bir optimizasyon yoluna gidilebilir. Elde edilen bulgulardan, hem mikro beton hem de çimento hamuru karışımlarının statik ve dinamik reolojik parametrelerinin farklılığını açıklamaya yönelik olarak önerilen mekanizma, Şekil 3.48 ve 3.49 yardımı ile açıklanacaktır:

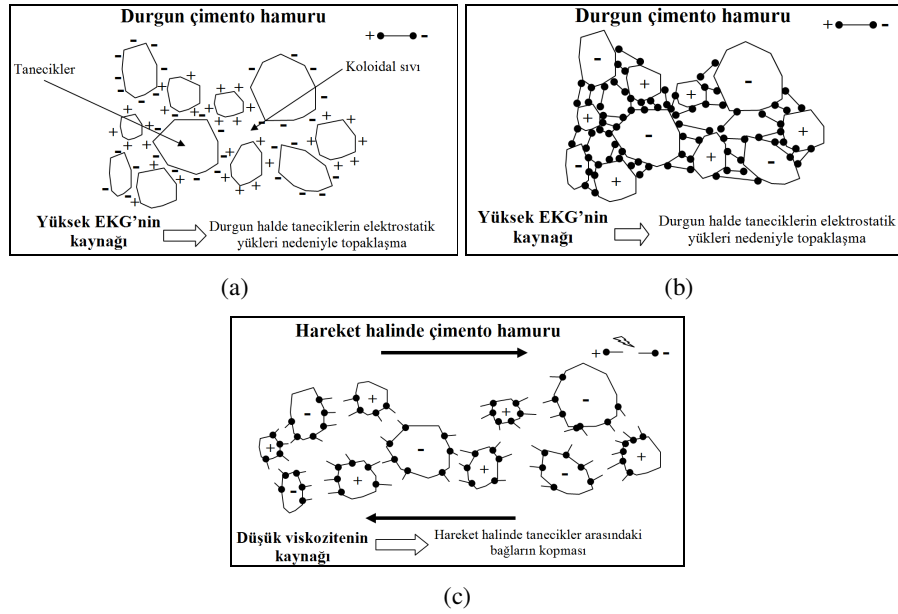
Mikro beton karışımlarında durgun halde EKG değeri oldukça düşüktür. Bunun nedeninin uzun yan zincirli polikarboksilat kökenli katkıların taneciklerin etrafını sararak yarattıkları sterik itki olduğu düşünülmektedir (Şekil 3.48a). Hareket halinde mikro beton tanecikleri etrafındaki katkı zincirleri yönlendirilerek, EKG değerini düşürmektedir. Harekete dik yöndeki bağlı zincirler kopmaktadır. Ancak, aynı anda tanecikler arasında kayma gerilmesinin daha az olduğu bölgelerde, polikarboksilat katkı zincirleri bağlayıcılık vazifesi görerek taneciklerin akışı topluca takip etmesine neden olmaktadır (Şekil 3.48b). Bu zincirler bir yay gibi düşünülürse, deformasyon hızı artışı ile birlikte bu yayların gerildiği ve tanecikleri bir arada kalmaya zorladığı söylenebilir (Şekil 3.48c). Bu durum mikro betonlarda EKG'nin düşerken, viskozitenin neden yüksek kaldığını açıklamaktadır. Uygun katkı dozajının kullanılması halinde, katkılı mikro betonlarda gözlenen “*sakızlanarak akma*” davranışı söz konusu mekanizmaya bağlanmıştır.

Diğer taraftan çimento hamuru karışımlarında durgun halde çimento tanecikleri arasında yüzey yüklerindeki farklılıklar nedeniyle topaklaşma eğilimi vardır (Şekil 3.49a). Bu eğilimi yaratan elektrostatik kuvvetler, Şekil 3.49b'deki gibi gevrek bağ kuvvetleri olarak şematize edilmiştir. Başlangıçtaki yüksek EKG değerinden bu kuvvetler sorumludur. Çimento hamuru karışımlarının harekete geçmesi ile birlikte sözü edilen gevrek bağ kuvvetleri kopmakta ve tanecikler arasında bir bağlantı kalmamaktadır (Şekil 3.49c). Böylece hareket halinde çimento hamuru karışımının viskozitesi çok düşük değerler almaktadır. Chougnet, Palermo, Audibert ve Moan (2008)'a göre hidratasyon gelişiminin henüz başlamadığı ilk zamanlarda, çimento hamurundaki kohezyonun nedeni, tanelerin temas noktalarındaki iyonik bağ kuvvetleri ve Van der Waals kuvvetleridir. Kohezyon oluşturan iyonik kuvvetlerin kaynağı ise boşluk suyunun yüksek pH ve yüksek Ca^{+2} konsantrasyonu olarak

açıklanmaktadır. Söz konusu bağ kuvvetlerinin, düşük deformasyon hızlarında kopmayacağı veya kopan bağların yeniden meydana geleceği dikkate alındığında, yüksek deformasyon hızlarının klasik çimento hamuru için ayrıştırıcı etkisi daha da belirginleşmektedir.



Şekil 3.48 Mikro beton karışımları için durgun ve hareket halindeki reolojik davranışı simgeleyen mekanizma.



Şekil 3.49 Çimento hamuru karışımları için durgun ve hareket halindeki reolojik davranışı simgeleyen mekanizma.

Kendiliğinden yerleşen mikro betonun reolojik davranışı, KYB'nin hamur fazı ile benzerlikler göstermektedir. Normal betonun hamur fazı olan “*çimento hamuru*” ile KYB'nin hamur fazı olan “*kendiliğinden yerleşen mikro beton*” bu çalışmada kapsamlı olarak incelenmiştir. Klasik bir beton karışımı için (15 cm çökme değerinde) teorik EKG değeri 1500-2000 Pa iken, KYB'de 50-100 Pa'a kadar düşmektedir. Aynı zamanda taze betonun plastik viskozitesi (μ) 50-200 Pa.s dolaylarındadır (Yammine, Chaouche, Guerin, Moranville ve Roussel, 2008). Normal betonun reolojik davranışı, agregalar ile hamur arasındaki sürtünme kuvvetleri ile açıklanmaktadır. Çünkü agregaların çimento hamurunda oluşturduğu kayma gerilmesi hamur davranışını, buradaki harç davranışında olduğu gibi değiştirmektedir. KYB'de ise hidrodinamik etkileşimin yanında sıvı faz viskozitesi de etkilidir. Bu durum KYB'lerde hamur hacminin fazla olmasından da kaynaklanmaktadır. Kendiliğinden yerleşen betonun hamur fazı için literatürde EKG değeri 1-10 Pa, plastik viskozite ise 0,5-5 Pa.s aralığında bulunmuştur (El Barak, Mouret ve Bascoul, 2009). Tez kapsamında bilyeli reometre ile yapılan incelemelerde ise, KYMB'nin stabil hamur fazı olarak kabul edilebilecek MB 1,2 tasarımının dinamik EKG değeri 5-15 Pa ve nihai viskozitesi 20-40 Pa.s aralığında bulunmuştur. Bu rakamlar fikir verme amaçlı olup, farklı reometre konfigürasyonlarında değişkenlik gösterebilir.

3.4.6.4.3 Lifli Mikro Beton Serisi. Bir önceki aşamada elde edilen bulgular yardımıyla, lif ilavesi için kullanılacak matrisin akışkanlaştırıcı katkı dozajı %1,2 olarak seçilmiştir (MB 1,2). MB 1,2 matrisi hem lifi bünyesine kabul etmekte, hem de stabilitesini koruyarak kolayca kalıba yerleştirilebilmektedir. Bu bölümde MB 1,2 matrisine toplam hacmin %1'i oranında PVA, PP ve YYPE lif ilavesinin, akma eğrisine etkisi incelenmiştir. Akma eğrisi verilerinin HB modeli ile analizi sonucu elde edilen grafikler, tüm deformasyon hızı değişim aşamaları için Şekil 3.50'de verilmiştir. Farklı deformasyon hızı değişimlerinde elde edilen tüm noktalar kullanılarak yapılan HB analizi eğrileri de Şekil 3.51'de sunulmuştur. Bekleneceği üzere tüm lifler akma eğrilerini önemli derecede etkilemiştir. Liflerin boy/çap oranları (PVA, PP ve YYPE lif için sırasıyla 267, 300 ve 555) arttıkça, işlenebilirliği olumsuz etkileme dereceleri artmaktadır. Aynı zamanda, uzun olan lifler kısa

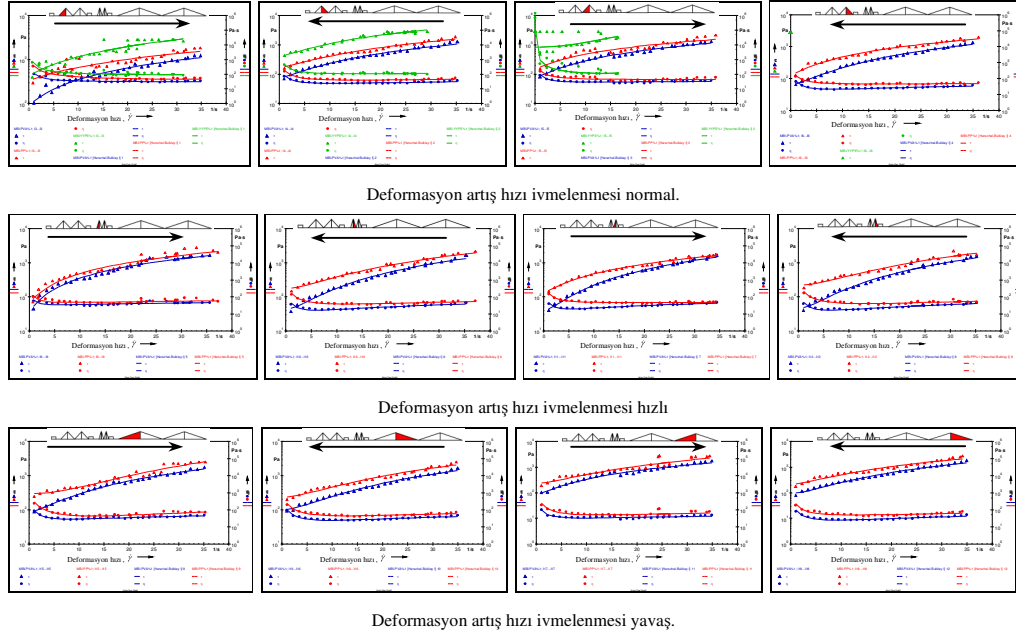
olanlara kıyasla işlenebilirliği daha kötü etkilemektedir. İşlenebilirlik açısından en olumsuz etkiyi yaratan lif YYPE olup, akma eğrisinin çıkartılmasında kullanılan küçük programın (makro) üçüncü aşamasından sonra bu karışımın içinde bilye sürüklenememiş, lifli matris bilyeyi tamamen kilitlemiştir. Bu nedenle üçüncü aşamadan sonraki grafiklerde, YYPE %1 için veri bulunmamaktadır. PVA ve PP liflerin %1 oranında kullanıldığı karışımlarda, PP lifin akma eğrisini PVA life kıyasla daha olumsuz etkilediği söylenebilir. HB analizi ile elde edilen EKG ve PV değerleri tüm aşamalar için Tablo 3.17’de sunulmuştur. PVA ve PP liflerin %1 oranında kullanıldığı karışımlarda, lifsiz MB matrisine (MB 1,2) kıyasla dinamik EKG değeri 5-30 kat artarken, nihai viskozite lif tipine bağlı olarak değişik miktarlarda artmıştır. Bilye lifli matris içinde ilk anda zorlanmasına karşın sürüklenebilmiştir. Her iki lifle hazırlanan karışımlarda tüm deformasyon hızı değişim aşamalarında akma eğrisi çıkartılmıştır.

Tablo 3.17 Lifli mikro betonların (%1) HB’ye göre bulunan $\tau_{o,dinamik}$ değerleri (Pa)

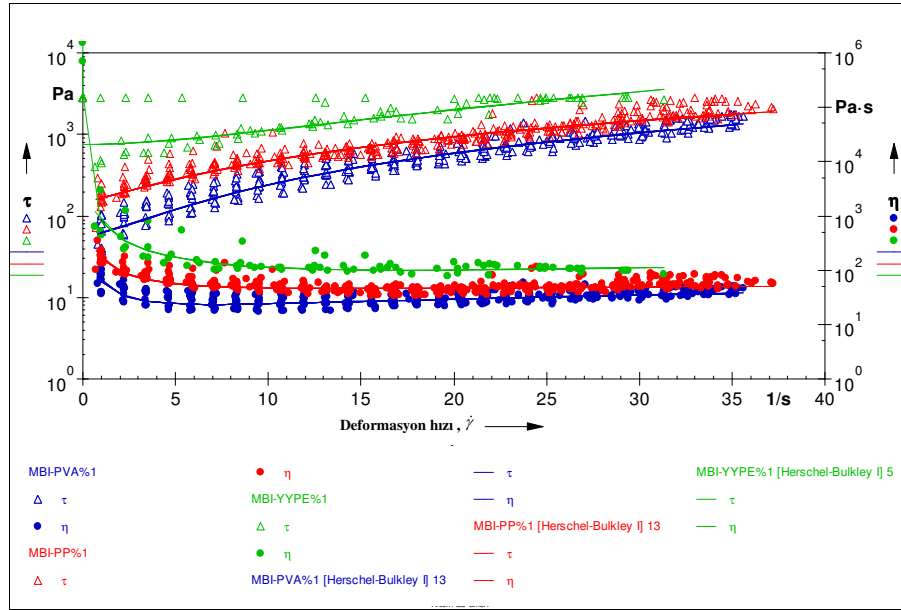
Mikro beton	3. bölüm	4. bölüm	5. bölüm	6. bölüm	9	10	11	12	15	16	17	18	ortalama
	Deformasyon artış hızı ivmelenmesi normal				Deformasyon artış hızı ivmelenmesi hızlı				Deformasyon artış hızı ivmelenmesi yavaş				(Pa)
	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	
MB 1,2 PVA-%1	92	76	79	65	41	44	41	47	87	100	88	95	57
MB 1,2 PP-%1	330	171	151	127	72	172	134	220	297	232	232	208	149
MB 1,2 YYPE-%1	438	401	839	_*	_*	_*	_*	_*	_*	_*	_*	_*	751

* Bilyenin matris içinde ilerleyemediği, kilitlendiği aşamalar (deney sonlandırılmıştır).

Viskozite değerlerinin incelendiği akma eğrisinde, karışımların viskozite değerlerinin deformasyon hızı artışı ile azaldığı, ancak hiçbir zaman çimento hamurlarından elde edilen değerler kadar azalmadığı görülmüştür. Bu durum lifli mikro betonların da lifsizlerde olduğu gibi, yüksek deformasyon hızlarındaki ayrışmaya karşı dirençli olduklarının bir göstergesidir. Aynı zamanda liflerin nihai viskoziteyi lifsiz matrislere kıyasla az da olsa bir miktar arttırdıkları belirlenmiştir (Tablo 3.18). Tüm karışımlarda akma eğrisindeki viskozite değeri yataylaşmaktadır (Şekil 3.50). En yüksek deformasyon hızı olan $35s^{-1}$ ’de okunan nihai viskozite değerleri Tablo 3.18’e işlenmiştir.



Şekil 3.50 Lifli mikro beton karışımlarının Herschel Bulkley model eğrileri, (%1 PVA mavi, %1 PP kırmızı, %1 YYPE yeşil).



Şekil 3.51 Tüm lifli mikro beton karışımlarının Herschel Bulkley model eğrileri, (Tüm deformasyon hızı değişimleri birlikte kullanılarak), (%1 PVA mavi, %1 PP kırmızı, %1 YYPE yeşil).

Lif dozajının hacimce %2'ye çıkarıldığı karışımlarda PVA ve PP lifli seriler ile deneyler yapılmış, ancak YYPE lif, %2 dozajda kullanıldığında reometreden ölçüm alınamamıştır. PP lifli seride de deneyin ikinci aşamasında reometrenin moment sınırı aşıp kilitlenme meydana geldiğinden deney yarım kalmıştır. PVA lifli seride lif dozajı %2 olmasına rağmen tüm aşamalar tamamlanmıştır. Ancak ilerleyen aşamalarda hedeflenen deformasyon hızlarının gerisinde kaldığı tespit edilmiştir (Şekil 3.52). Bu sırada bilye önünde zaman zaman lif birikmesi olduğu, liflerin bilyenin dönüşünü yavaşlattığı, hatta matrisin büyük kısmının bilye etrafında toplanarak bilye ile birlikte hareket ettiği gözlenmiştir. Tüm lifler, %2 kullanım oranında bilyenin sürüklenmesini engellemiştir. Lifler arasında bu dozajda sürüklenmeyi en az etkileyen, incelenen en kısa lif olan PVA lifidir. PVA ve PP lifli serilerden elde edilen akma eğrileri Şekil 3.52'de ayrı ayrı, Şekil 3.53'de tüm deformasyon hızı verileri kullanılarak topluca sunulmuştur. Analizler sonucu elde edilen dinamik EKG ve nihai viskozite değerleri sırasıyla Tablo 3.19 ve 3.20'de listelenmiştir.

Tablo 3.18 Lifli mikro betonların (%1) HB'ye göre bulunan nihai viskozite (η_{inf}) değerleri (Pa.s)

Mikro beton	3. bölüm	4. bölüm	5. bölüm	6. bölüm	9	10	11	12	15	16	17	18	ortalama
	Deformasyon artış hızı ivmelenmesi normal				Deformasyon artış hızı ivmelenmesi hızlı				Deformasyon artış hızı ivmelenmesi yavaş				
	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	
MB 1,2 PVA-%1	32	30	33	34	45	38	43	40	44	40	42	42	38
MB 1,2 PP-%1	44	45	43	48	57	53	47	55	43	60	65	62	51
MB 1,2 YYPE-%1	94*	111**	119***	-	-	-	-	-	-	-	-	-	113

nihai viskozite (η_{inf}) değeri, en büyük deformasyon hızında ($35s^{-1}$) elde edilen anlık viskozite değeridir.

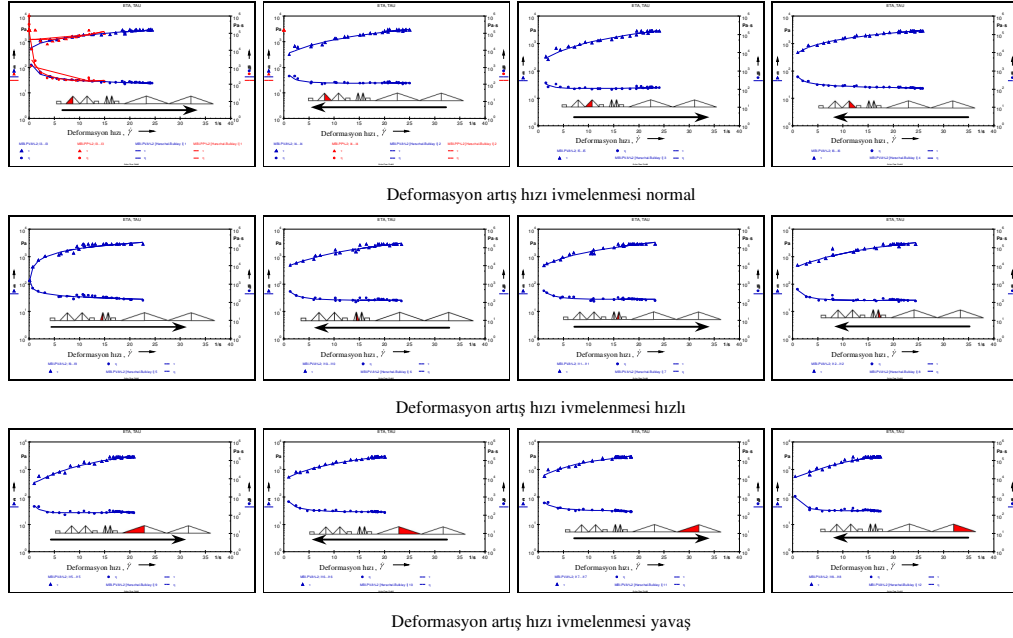
* def. hızı $31s^{-1}$ 'e kadar çıkabildiği için bu değerdeki viskozite verilmiştir.

** def. hızı $29s^{-1}$ 'e kadar çıkabildiği için bu değerdeki viskozite verilmiştir.

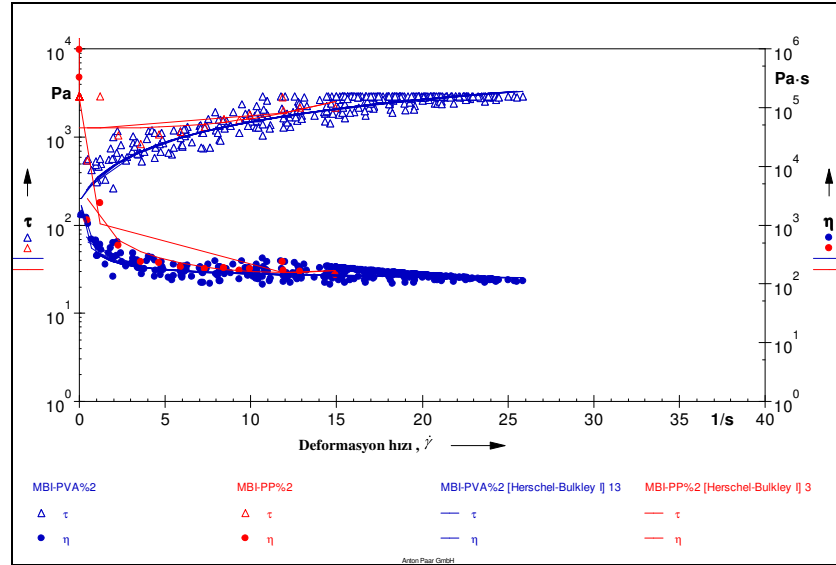
*** def. hızı $16s^{-1}$ 'e kadar çıkabildiği için bu değerdeki viskozite verilmiştir.

Elde edilen bulgular bu çalışmada incelenen polimer lifli matrislerin %2 kullanım oranında, reolojik özelliklerinin bilyeli reometre sistemi kullanılarak ölçülemeyeceğini göstermiştir. Bu derece yüksek kullanım oranı özellikle PP ve YYPE lifli karışımlar için hem karıştırma güçlüğü yaratmakta, hem de taşıma, işleme ve perdahlama sorunlarına yol açmaktadır. Uygulamada yüksek lif dozajları, saha şartlarında doğrudan kullanım yerine, prefabrik ekstrüzyon veya presleme gibi

yöntemlerde kullanılabilir. Ancak bu konu tez kapsamı dışında olup, 7. Bölüm’de öneriler arasında verilmiştir.



Şekil 3.52 Lifli mikro beton karışımlarının Herschel Bulkley model eğrileri, (%2 PVA mavi, %2 PP kırmızı).



Şekil 3.53 Lifli mikro beton karışımlarının Herschel Bulkley model eğrileri, (Tüm deformasyon hızı değişimleri birlikte kullanılarak), (%2 PVA mavi, %2 PP kırmızı).

Tablo 3.19 Lifli mikro betonların (%2) HB'ye göre bulunan $\tau_{o,dinamik}$ değerleri (Pa).

Mikro beton	3. bölüm	4. bölüm	5. bölüm	6. bölüm	9	10	11	12	15	16	17	18	ortalama
	Deformasyon artış hızı ivmelenmesi normal				Deformasyon artış hızı ivmelenmesi hızlı				Deformasyon artış hızı ivmelenmesi yavaş				
	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	
MB 1,2 PVA-%2	462	311	212	311	43	403	405	388	284	447	429	485	182**
MB 1,2 PP-%2	1211	2850<	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	1276**
MB 1,2 YYPE-%2	2850<	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	2850<

* Bilyenin matris içinde ilerleyemediği, kilitlendiği aşamalar (deney sonlandırılmıştır).

** Tüm noktaların regresyon analizi sonucu elde edilen tek eğriden okunan değerdir. Aynı ayrı ölçüm sonuçlarının ortalaması değildir.

Tablo 3.20 Lifli mikro betonların (%2) HB'ye göre bulunan nihai viskozite (η_{inf}) değerleri (Pa.s)

Mikro beton	3. bölüm	4. bölüm	5. bölüm	6. bölüm	9	10	11	12	15	16	17	18	ortalama
	Deformasyon artış hızı ivmelenmesi normal				Deformasyon artış hızı ivmelenmesi hızlı				Deformasyon artış hızı ivmelenmesi yavaş				
	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	
MB 1,2 PVA-%1	116	122	121	116	147	132	143	133	151	152	166	181	129**
MB 1,2 PP-%1	168*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	167**
MB 1,2 YYPE-%1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

nihai viskozite (η_{inf}) değeri, en büyük deformasyon hızında ($35s^{-1}$) elde edilen anlık viskozite değeridir.

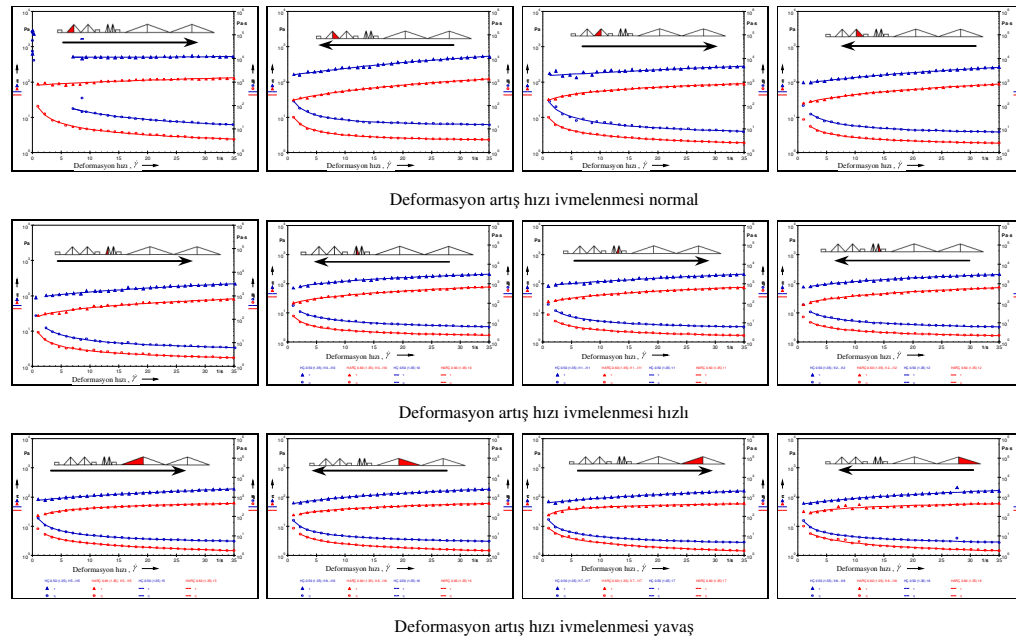
* def hızı $20-25s^{-1}$ 'e kadar çıkabildiği için bu değerdeki viskoziteler verilmiştir.

** Tüm noktaların regresyon analizi sonucu elde edilen tek eğriden okunan değerdir. Aynı ayrı ölçüm sonuçlarının ortalaması değildir.

3.4.6.4.4 Çimento Harcı Serisi. Bünyesinde iri tanecikler (kum) barındıran karışımların performansını belirlemek ve mikro betonlarla karşılaştırmak için S/Ç oranı 0,50 olan standart harç ve 0,60 olan sulu harç karışımları hazırlanmıştır. Her iki karışımda da standart kum Çimento/Kum=1/3 oranında olacak şekilde kullanılmıştır. Akma eğrileri farklı deformasyon hızı değişimleri için ayrı ayrı Şekil 3.54'de ve tüm deformasyon hızı değişimi verileri için topluca Şekil 3.55'de verilmiştir. Çimento harcında S/Ç oranı artışı ile hem dinamik EKG, hem de viskozite değerleri azalmaktadır. S/Ç oranı 0,50 olan harçta bilye ilk harekete geçişte zorlanmış ve başlangıçta elde edilen veriler hedef deformasyon hızlarından sapmıştır. Ancak ilerleyen aşamalarda bilye bir turunu tamamladığında veri alınmaya başlanmıştır (Şekil 3.54).

Grafiklerden alınan dinamik EKG ve nihai viskozite değerleri Tablo 3.21 ve 3.22'de listelenmiştir. S/Ç oranı 0,50 olan harçta, çimento hamuru karışımlarına benzer şekilde, çok düşük nihai viskozite ve yüksek dinamik EKG değerleri elde edilmiştir. S/Ç oranı 0,60'a çıkartıldığında kum tanelerinin bilyenin dönüşü sırasında

yüzeye çıktığı, hareketle kum tanelerinin çimento hamurundan ayrılmaya başladığı tespit edilmiştir (Şekil 3.56). Viskozite değeri bir süre sonra 2 Pa.s gibi çok düşük bir değere sabitlenmiştir. Ölçülen çok düşük viskozite değerleri, akış anında söz konusu matrisin, kumu bünyesinde barındırmakta zorlanacağının ve ayrışabileceğinin göstergesidir (Tablo 3.22). İri agrega içeren ve yüksek S/Ç oranında hazırlanan betonun bıçaklı reometre (CONTEC BML) ile ölçümünde de benzer bir ayrışma rapor edilmiştir. Şekil 3.57’de kayma gerilmesinin en fazla olduğu bölgedeki ayrışma görülebilmektedir (Wallevik, 2003). Düşük viskoziteli çimento hamurunun, agrega tanelerini şiddetli dinamik etki altında taşıyamadığı, zemindeki sıvılaşmaya benzeyen bir ayrışmanın meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 3.54 Harç karışımlarının Herschel Bulkley model eğrileri, (Harç 0,50 mavi, harç 0,60 kırmızı).

Tablo 3.21 Harçların HB’ye göre bulunan $\tau_{o,dinamik}$ değerleri (Pa).

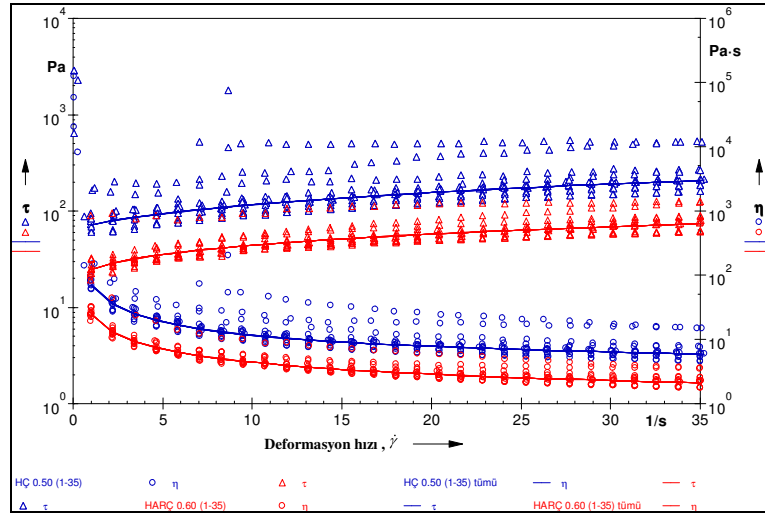
Harçlar	3. bölüm	4. bölüm	5. bölüm	6. bölüm	9	10	11	12	15	16	17	18	Tümü*
	Deformasyon artış hızı ivmelenmesi normal				Deformasyon artış hızı ivmelenmesi hızlı				Deformasyon artış hızı ivmelenmesi yavaş				
	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	
H 0,50	504	153	150	87	88	58	86	60	73	54	59	53	64
H 0,60	79	28	21	21	22	18	19	17	18	18	18	9	6

* Şekil 3.54’deki HB analizinden elde edilen sonuçlardır.

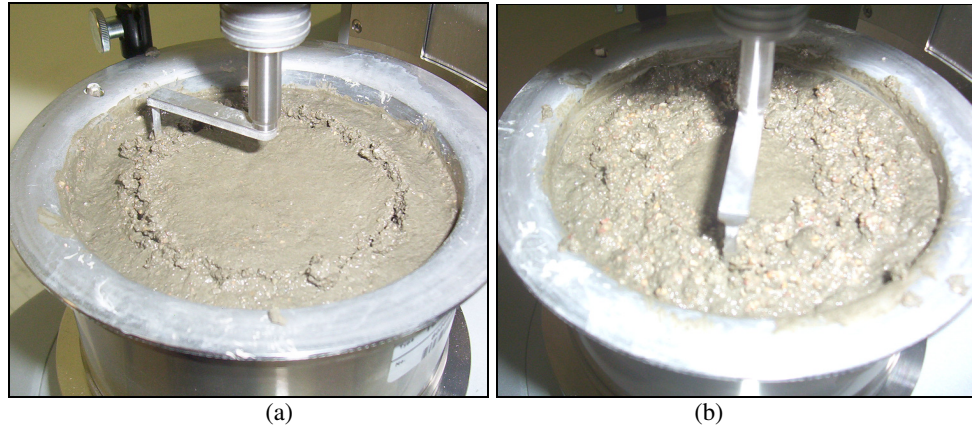
Tablo 3.22 Harçların HB'ye göre bulunan nihai viskozite (η_{inf}) değerleri (Pa.s).

Harçlar	3. bölüm	4. bölüm	5. bölüm	6. bölüm	9	10	11	12	15	16	17	18	Tümü*
	Deformasyon artış hızı ivmelenmesi normal				Deformasyon artış hızı ivmelenmesi hızlı				Deformasyon artış hızı ivmelenmesi yavaş				(Pa.s)
	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)	
H 0,50	15	15	8	8	6	6	6	6	5	5	4,5	4,5	19
H 0,60	3,5	3,5	3,5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

* Şekil 3.54'deki HB analizinden elde edilen sonuçlardır.



Şekil 3.55 Harç karışımlarının Herschel Bulkley model eğrileri, (Tüm deformasyon hızı değişimleri birlikte kullanılarak), (Harç 0,50 mavi, harç 0,60 kırmızı).



Şekil 3.56 a) S/Ç oranı 0,50 olan harçta bilyenin sürüklenmesi, b) S/Ç oranı 0,60 olan harçta kum taneciklerinin ayrışarak yüzeye çıkması.

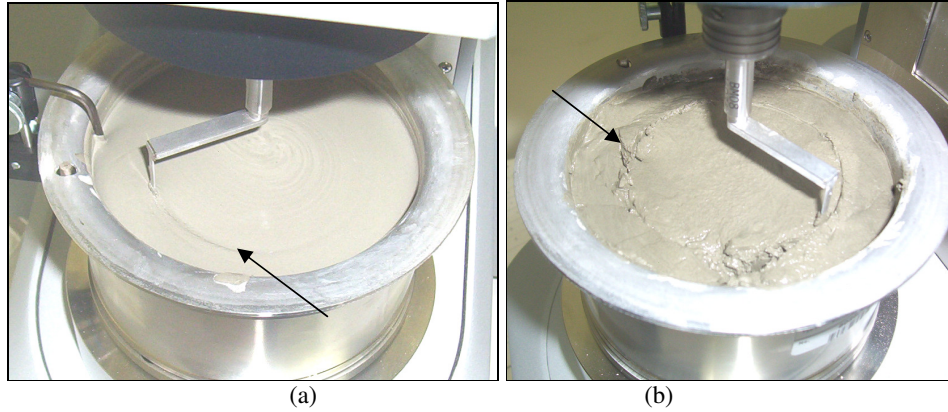


Şekil 3.57 İri agrega içeren ve yüksek S/Ç oranında hazırlanan betonun ölçüm sırasında ayrışması (Wallevik, 2003).

Çimento harcında hacmin önemli bir bölümünü kum fazı oluşturduğu için, reolojik davranışta tanecikler arasındaki sürtünme ve çarpışma kaynaklı etkileşimler baskın olmaktadır. Bu nedenle, çimento hamurundaki taneler arası elektrostatik veya iyonik etkileşimler önemini kaybetmektedir (Lombois-Burger ve diğer., 2006). Ancak kum oranı düşürülürse hamur fazının, davranışı etkileme ihtimali ortaya çıkabilir. Kum oranı hacimce %10-40 seviyelerine düşürülmüş olan kendiliğinden yerleşen harçlar için literatürde EKG ve plastik viskozite değerleri 20-50 Pa ve 0,2-0,5 Pa.s olarak rapor edilmiştir (Lu, Wang ve Rudolphi, 2008).

3.4.6.4.5 Tüm Serilerin Birlikte Değerlendirilmesi. Reometre ölçümlerinin yapılması aşamasında, bilyenin karışımlar içinde sürüklenmesi ile ilgili görsel bazı veriler de elde edilmiştir. Bu veriler, yapılan analizler sonucu elde edilen reolojik büyüklükler kullanılarak yorumlanmıştır. Çimento hamuru (S/Ç oranı 0,250 olan karışım hariç) ve lifsiz KYMB karışımlarında sürüklenme sırasında, bilye sorunsuz şekilde matris içinde dönmekte ve bilyenin bağlı olduğu kol, yüzeyi yararak ve hedeflenen deformasyon hızını kolayca sağlayarak yoluna devam etmektedir. Sadece S/Ç oranının en düşük olduğu karışımda ve bazı lifli karışımlarda, başlangıçta ilk turu atıncaya kadarki bölümlerde deformasyon hızı hedefinde geri kalma söz konusudur. Lifsiz mikro betonlarda özellikle %1,2 ve 1,4'lük katkı dozajlarında bilyeyi tutan kolun yüzeyde oluşturduğu yarıлма izi, bilye bir turunu tamamlarken ortadan kaybolmaktadır (Şekil 3.58a). Bu durum karışımın bilyenin sürüklenirken

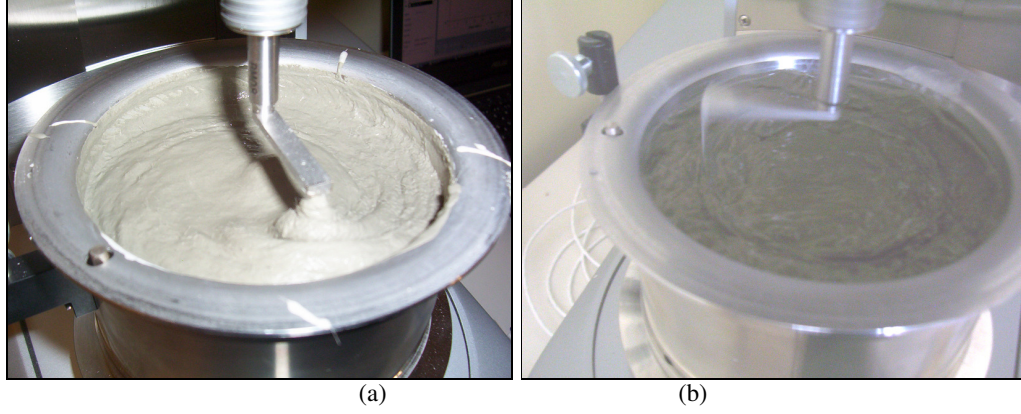
boşalttığı bölgeyi hemen doldurma ve tekrar birleşme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Diğer yandan çimento hamurlarında yarıma izi hiçbir zaman tam olarak kapanmamaktadır (Şekil 3.58b). Yapılan bu gözlem mikro beton ve çimento hamuru karışımlarının reolojik davranışlarını açıklamada kullanılan varsayımı desteklemektedir (Şekil 3.48-3.49).



Şekil 3.58 a) Lifsiz mikro betonda (MB 1,2) hemen kapanan yarıma izi, b) Çimento hamurunda (ÇH 0,275) kapanmayan yarıma izi.

Lifli mikro beton karışımlarından %1 PVA, %1 PP lifi içeren karışımlarda bilyenin bağlı olduğu kol, lifli matrisi yarabilmektedir. Lif dozajı çok yüksek olmadığından ön kısımda biriken lifler yanlara dağılarak akışı durdurmamaktadır. Bu karışımlar lifli matrislerden sorunsuz olanlarıdır. Bilye, matrisin akıcı ve aynı zamanda stabil kıvamı nedeniyle lifli ortamda hareket edebilmektedir (Şekil 3.59a, 3.59b). Ayrıca %2 PVA içeren karışımda da bilye başlangıçta sorunsuz şekilde dönmekte, ancak zamanla yoğun lif dozajı nedeniyle liflerin bilye üstünde ve kol önünde birikmesi sürüklenmeyi zorlaştırmaktadır (Şekil 3.60). Bu engelleme durumu %2 PP ve %1 YYPE katkılı karışımlarda hareketin tamamen kesilmesine yol açacak mertebelere ulaşmıştır (Şekil 3.61, 3.62a). Reometre yardımıyla ölçülen moment değerleri, hemen sınıra ulaşmakta ve kilitlenme ile reometrenin hedeflenen deformasyon hızlarına ulaşması imkansız hale gelmektedir. Lifler bilyeyi sararak reometre haznesindeki tüm malzemenin, hazne içinde dönmesine de neden olabilmektedir. Örneğin YYPE lif içeren karışımda, deney üçüncü aşamada sonlandırılmak zorunda kalınca, kaldırılan bilye, beraberinde etrafına dolanan bir

miktar lifli harcı da yukarı kaldırmıştır (Şekil 3.62b). Bu durumda bilyenin ortamda sürüklenmesi yerine, karışımın kap içinde hareketi ortaya çıkmaktadır ki ölçümler reolojik olarak anlamsız hale gelmektedir.



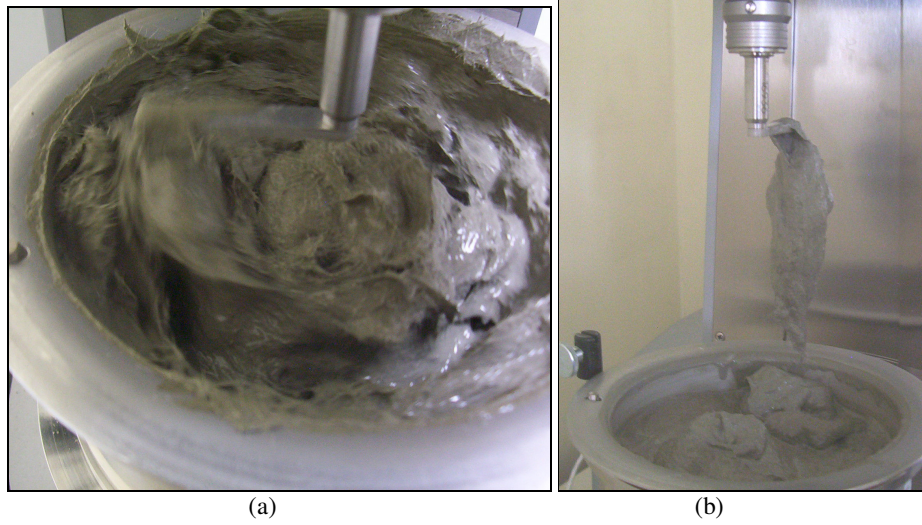
Şekil 3.59 a) %1 PVA ve b) %1 PP lifli karışımlarda bilyenin diğer lifli mikro beton karışımlarına kıyasla daha kolay hareketi.



Şekil 3.60 Bilye %2 PVA katkılı karışım içinde dönerken ön kısımda lif kümelenmesinin yarattığı yükselme.



Şekil 3.61 %2 PP katkılı karışım içinde bilye hareketinin harçta yarattığı dalgalanma.

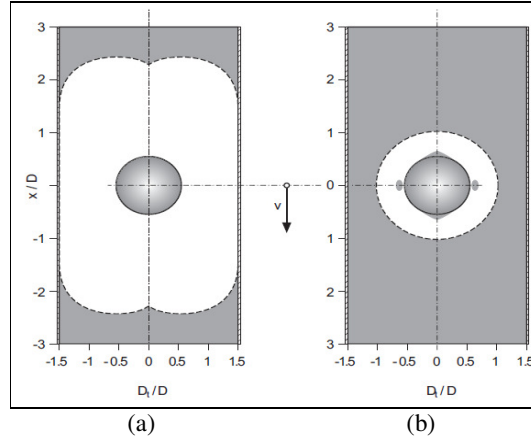


Şekil 3.62 %1 YYPE katkılı mikro beton; a) Karışım içinde bilyenin kilitlenmesi, b) Bilye etrafına sarılmış lifli matris kümesi.

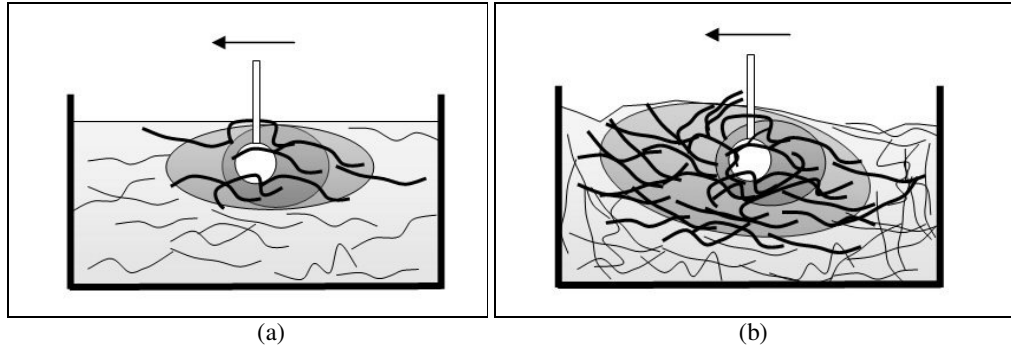
Yapılan incelemelerde matriste sürüklenmekte olan bilyenin önünde ve etrafında aktif bir gerilme alanı olduğu gözlenmiştir. Bu durum bilyenin dönüş hızı ile yakından ilişkilidir. Bilyenin dönüş hızı arttırıldıkça aktif alan genişlemektedir. Beaulne ve Mitsoulis (1997), yaptıkları nümerik analizde bir tüp içinde bilye hareketinin yarattığı aktif gerilmeyi incelemiştir. Bu çalışmada, çapı tüp çapının üçte biri kadar olan bir bilyenin, eşik kayma gerilmesi $\tau_o = 46,5$ Pa ve viskozitesi 23,9 Pa.s olan bir sıvı içinde farklı sürüklenme hızlarında (a: 6 m/s, b: 0,001 m/s) ilerlemesi modellenmiştir. Farklı hızlarda bilye etrafında oluşan aktif kayma gerilmesi bölgeleri Şekil 3.63’de verilmiş olup, hız artışı ile gerilme alanının arttığı sonucu elde edilmiştir.

Aynı zamanda *bilyenin içinde sürüklendiği malzemede bulunan katı cisimlerin miktar, boyut ve geometrileri de aktif gerilme alanını genişletmektedir*. Örneğin uzun bir lif, bilyenin matriste etkileyeceği aktif alanı, kısa bir life göre çok daha fazla arttırmaktadır. Benzer şekilde lif dozajı da arttıkça aktif alan artacaktır (Şekil 3.64). Aktif gerilme alanının artması, bilyenin maruz kaldığı moment değerini de yükselteceğinden reolojik parametrelerde artış olmaktadır. Eğer lif gibi birbirini tutup kitleyen geometrideki malzemeler yüksek dozajda kullanılmışsa ve uygun boyutta değilse veya matris kohezyonu bu liflerin hareket yönünde yönlendirmesini

engelleyecek derecede yüksek ise, aktif gerilme alanı tüm ölçüm haznesine yayılarak bilyenin hareketini kısıtlayabilmektedir (Bikard, Menard, Peuvrel-Disdier ve Budtova, 2006).



Şekil 3.63 Çapı tüp çapının üçte biri kadar olan bir bilyenin bir sıvı ($\tau_o=46,5$ Pa, $m=23,9$ Pa.s) içinde farklı sürüklenme hızlarında (a: 6 m/s, b: 0,001 m/s) etrafında oluşan aktif kayma gerilmesi bölgeleri (Beaulne ve Mitsoulis, 1997).



Şekil 3.64 Lif dozajına bağlı olarak bilyenin yarattığı aktif kayma bölgesinin değişimi; a) düşük lif dozajı, b) yüksek lif dozajı.

3.4.7 Akma Eğrileri Yardımı ile Histeresiz Alanlarının Tespiti

Bu bölümde kayma gerilmesi – deformasyon hızı grafiklerinin çıkış ve iniş bölgelerinin arasında kalan alanlar kullanılarak “*histeresiz alanları*” hesaplanmıştır. Akma eğrisi için toplam 18 bölümden oluşan küçük programın (makro) 3., 4., 5. ve

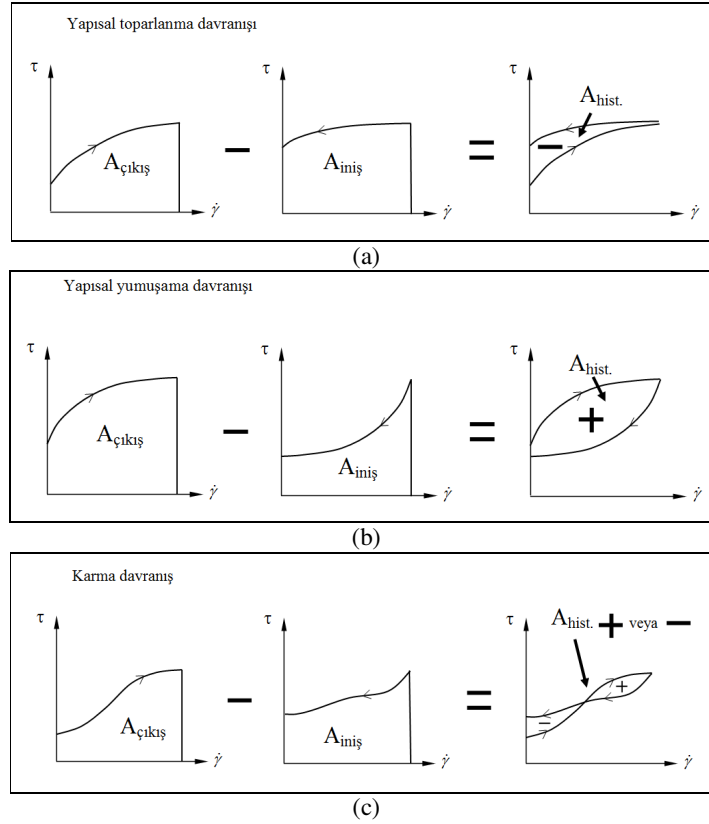
6. bölümü orta hızda deformasyon hızı artışı ve azalışı, 9., 10., 11. ve 12. bölümü yüksek hızda deformasyon hızı artışı ve azalışı, son olarak 15., 16., 17. ve 18. bölümü ise düşük hızda deformasyon hızı artışı ve azalışı bölümlerini oluşturmaktadır (Şekil 3.40). Bu bölümlerdeki çıkış ve iniş grafikleri ikişerli gruplandırılarak çizildiğinde, eğrilerin aynı noktalardan ilerlemediği, aralarında bir alan oluştuğu belirlenmiştir. Bu alan “*histeresiz alanı*” olarak adlandırılmaktadır. Histeresiz alanları Rheoplus programı yardımıyla aşağıdaki formüller kullanılarak belirlenmiştir:

$$A_{histeresiz} = \left[\sum_{i=1}^{n-1} A_{i,\text{çıkış}} \right] - \left[\sum_{i=1}^{n-1} A_{i,\text{iniş}} \right] \quad (3.6)$$

$$A_i = \frac{1}{2} [(\dot{\gamma}_{i+1} - \dot{\gamma}_i) \cdot (\tau_i + \tau_{i+1})] \quad (3.7)$$

burada; n: veri sayısı, $A_{histeresiz}$: Histeresiz alanı (Pa/s), $A_{i,\text{çıkış}}$: Çıkış akma eğrisi altında kalan alan (Pa/s), $A_{i,\text{iniş}}$: İniş akma eğrisi altında kalan alan (Pa/s), τ : Kayma gerilmesi (Pa), $\dot{\gamma}$: Deformasyon hızı (s^{-1}) olarak adlandırılmaktadır.

Histeresiz alanı malzemelerin deformasyon hızı değişimi karşısında yapısal olarak yumuşama (*structural breakdown*) veya toparlanma (*structural recovery*) özelliklerinin belirlenmesinde kullanılabilir (Koehler ve Fowler, 2004). Literatürde, histeresiz alanları kullanılarak malzemelerin tiksotropik davranışının da incelenebileceğini iddia eden çalışmalar mevcuttur (Papo ve Piani, 2004, Wallevik, 2005, Wallevik, 2006, Westerholm, ve diğer., 2007, Hanehara ve Yamada, 2008). Ancak histeresiz alanı, deformasyon hızı değişimine bağlı olarak değişkenlik göstermekte ve aynı karışım için kullanılan yöntemle göre farklı deformasyon hızı aralıklarında farklı alanlar elde edilebilmektedir (Baudez, 2006). Tiksotropi ise durağan halden harekete geçme anında, reolojik parametrelerin zamana bağlı değişimi ile ifade edileceğinden aslında farklı bir kavramdır (Overlaz ve Roussel, 2006, Wallevik, 2003, Roussel, 2007, Baudez, 2006). Histeresiz alanları yardımıyla tiksotropi hakkında bir fikir edinilse de sayısal verilerle yorum yapmak, histeresiz alanlarının aldığı şekiller nedeniyle her zaman mümkün olamayabilir. Histeresiz alanı, akma eğrisinin şekline göre üç farklı türde meydana gelebilir. Her üç durum Şekil 3.65’de sunulmuştur.

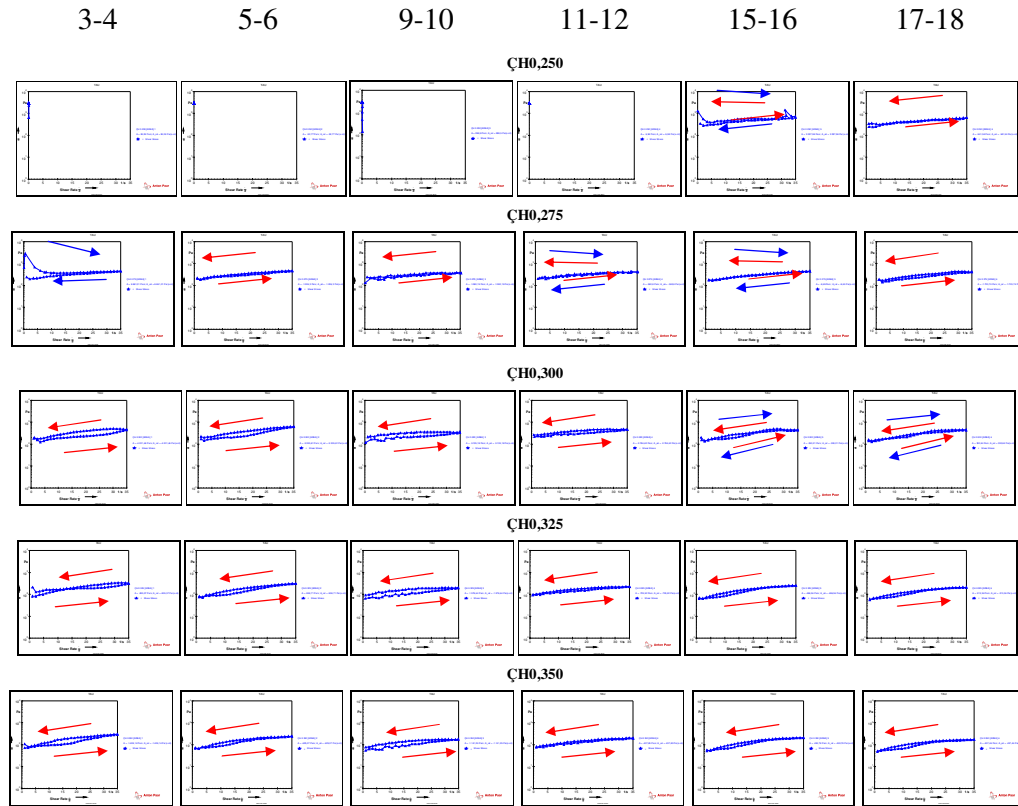


Şekil 3.65 Histeresiz alanı türleri; a) Toparlanma (anti-tiksotropi), b) Yumuşama (tiksotropi), c) Karma davranış.

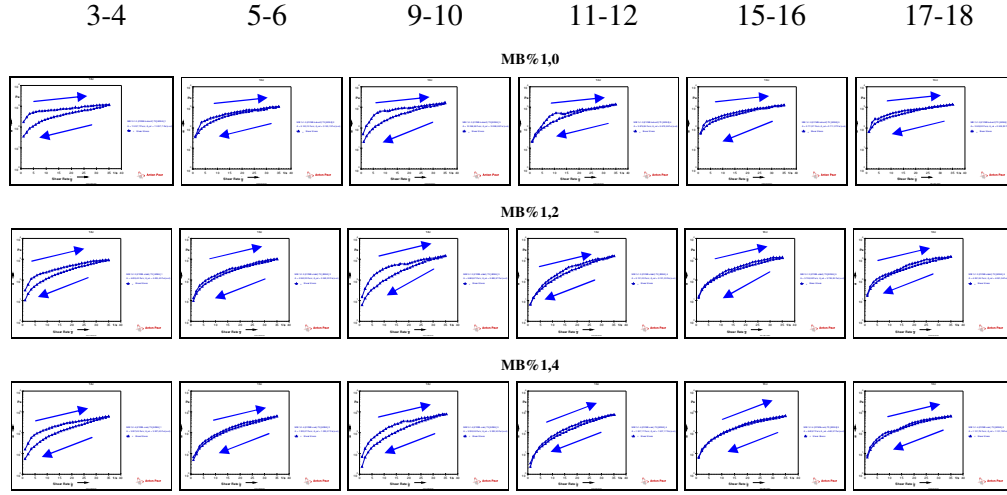
Deformasyon hızı artışının gerçekleştiği çıkış eğrisi, deformasyon hızı azalışının gerçekleştiği iniş eğrisinin altında kalıyorsa, çıkış eğrisi ile iniş eğrisi altında kalan alanlar arasındaki fark negatiftir ve bu davranışa yapısal toparlanma (*structural recovery*) adı verilmektedir (Şekil 3.65a). Özellikle eşik kayma gerilmesi yüksek karışımlarda, yapısal toparlanma davranışı gözlenmiştir. Koehler ve Fowler (2004)'e göre bu davranış “*tiksotropi tersi davranış, (anti-thixotropy)*” olarak adlandırılmaktadır. Yapısal yumuşama (*structural breakdown*) davranışında ise çıkış eğrisi üstte ve iniş eğrisi altta olup, alanlar arası fark pozitifdir (Şekil 3.65b). Bu davranış tiksotropik malzemelerde belirgindir. Karma davranışta ise, eğrilerin birbiri içine geçmesi nedeniyle eğrilerin altında kalan alanlar arası fark pozitif veya negatif olabilir (Şekil 3.65c). Karma davranışta birkaç kez iç içe geçme, önce çok yüksek kayma gerilmesi değerinden başlama gibi alternatif durumlara da rastlanabilmektedir. Histeresiz alanlarında gözlenen diğer bir durum da, çıkış eğrisinin başlangıç noktası ile iniş eğrisinin bitiş noktasının aynı yerde olmamasıdır.

Wallevik (2005), bu duruma pek çok karışımda rastlamış olup, farklılığın kaynağının karıştırma nedeniyle içyapıda meydana gelen geri dönüşümsüz ayrışmalar veya sonrasında düşük deformasyon hızlarında meydana gelen yeniden kümelenmeler olduğunu belirtmektedir (Wallevik, 2005).

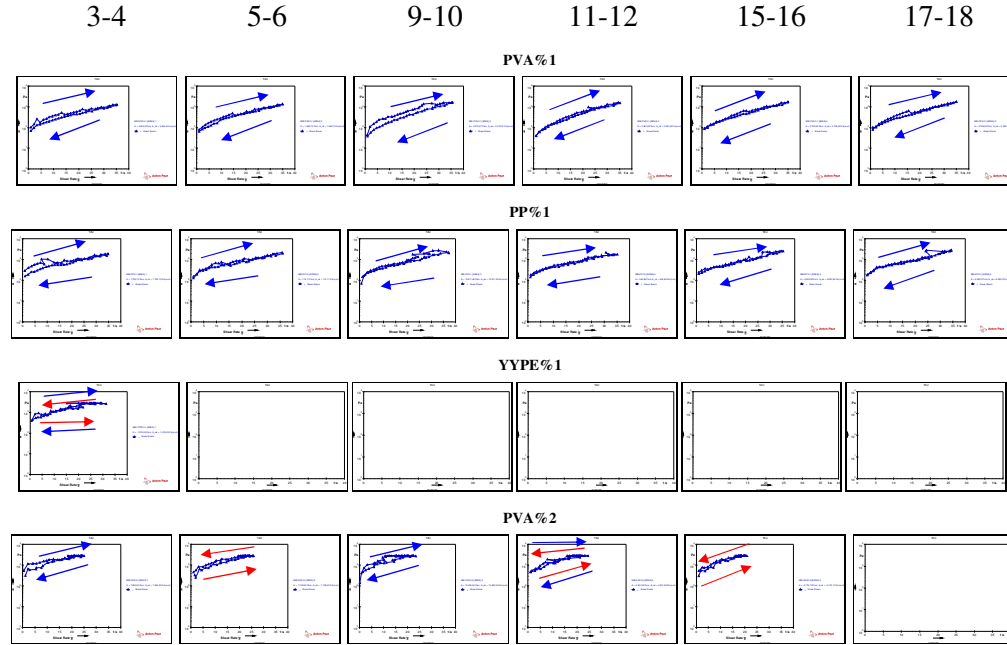
Çimento hamuru, mikro beton ve lifli mikro beton serilerinden elde edilen histeresiz alanı grafikleri Şekil 3.66-3.68’de ayrı ayrı gösterilmiştir. Reometre yardımı ile uygulanan yöntemin ilgili bölüm numaraları grafiklerin üzerinde verilmiştir. Her çıkış eğrisi ve iniş eğrisi, grafikler üzerinde oklarla işaretlemiş olup, negatif histeresiz alanları kırmızı oklarla, pozitif histeresiz alanları mavi oklarla işaretlenen grafiklerden elde edilmiştir. Ayrıca eğrilerin birbirini bir veya daha çok defa kestiği “*karma davranış*” gösteren karışımlarda hem mavi hem de kırmızı okla işaretleme yapılmıştır. S/Ç oranı en düşük olan (0,250) çimento hamurunun katı kıvamı nedeniyle bilye bir turu tamamlayamadığı için, ilk dört histeresiz çemberi elde edilememiştir (Şekil 3.66).



Şekil 3.66 Çimento hamuru karışımlarının histeresiz çemberleri.



Şekil 3.67 Lifsiz mikro beton karışımlarının histeresiz çemberleri.



Şekil 3.68 Lifli mikro beton karışımlarının histeresiz çemberleri, (%2 PP ve %2 YYPE lifli mikro betonlarda lif kilitlemesi nedeniyle histeresiz çemberi alınacak eğri elde edilememiştir).

Tablo 3.23'den görüldüğü üzere, çimento hamurlarında özellikle düşük S/Ç oranındaki ve deney başlangıçlarındaki birkaç istisna dışında, genellikle negatif histeresiz alanı değeri elde edilmiştir. Hareket hızı artarken çimento tanecikleri arası elektrostatik bağ kuvvetleri kopmakta, hareket yavaşladığında ise tekrar tanecikler arası elektrostatik yük çekimi nedeniyle tekrar ve ani kümelenme meydana gelmektedir. Böylece iniş eğrisi, çıkış eğrisinin altında kalmaktadır. Bunun anlamı,

çimento hamuru karışımlarının artan ve sonrasında azalan deformasyon hızları sonucunda başlangıçtan daha yüksek kayma gerilmesine maruz kaldığıdır. Çimento hamurları deformasyon hızı azalması ile tekrar toparlanma eğilimindedir. Elde edilen bu bulgular, bir önceki bölümde çimento hamurları için HB modeli ile hesaplanan yüksek EKG değerlerini destekler niteliktedir. Diğer taraftan mikro beton serilerinin tümünde ve lifli mikro betonların birkaç istisnai örneği dışında, hemen hemen hepsinde kayma gerilmesi değerleri, iniş eğrisinde daha düşük değerler almakta ve böylece pozitif histeresiz alanları elde edilmektedir (Şekil 3.67 ve 3.68, Tablo 3.23). Mikro beton serilerinde elde edilen pozitif histeresiz alanları, bu karışımlarının deformasyon hızı artış ve sonrasında azalışı ile bilyeye uyguladıkları kayma gerilmesinin azaldığını göstermektedir. Mikro betonlar hareketlendirildiklerinde düşük kuvvetler altında da sürekli harekete devam edebilmektedir. Lifli mikro beton serilerinde ise, özellikle yüksek lif dozajlarında ve YYPE lif kullanıldığında karma davranış söz konusu olmakta, liflerin bilyenin sürüklenmesine yalpalayıcı etkisi, bilyenin maruz kaldığı kayma gerilmesi değerlerini yükseltmekte, aynı zamanda eğriler arasında kalan alanın işaretini de etkilemektedir.

Tablo 3.23 Çimento hamuru, mikro beton ve harçların histeresiz alanları (Pa/s)

Karışım kodu	Uygulanan yazılımın (makro) bölüm numarası						Davranış
	3-4	5-6	9-10	11-12	15-16	17-18	
ÇH 0,250	-	-	-	-	2338	-942*	Karma
ÇH 0,275	8861	-1006	-1080	-363	-8	-1703	Toparlanma
ÇH 0,300	-4202	-3356	-3135	-2785	-393	331	Toparlanma
ÇH 0,325	-855	-958	-1579	-706	-487	-313	Toparlanma
ÇH 0,350	-1408	-625	-1141	-438	-494	-457	Toparlanma
MB 1,0	11037	3163	10289	3877	2711	2905	Yumuşama
MB 1,2	4633	2242	6884	3121	3706	4081	Yumuşama
MB 1,4	3207	1323	3333	1307	843	1102	Yumuşama
PVA %1	3664	1846	9312	2662	2701	2768	Yumuşama
PP %1	7729	114	12811	341	4561	6082	Yumuşama
YYPE %1	-1074*	27239*	-	-	-	-	Karma
PVA %2	7954	-7138*	13406*	4322*	-4178*	-	Karma
Harç 0,50	20498	1421	234*	21*	259*	-59*	Karma
Harç 0,60	1104	288	163*	96*	56*	12*	Karma

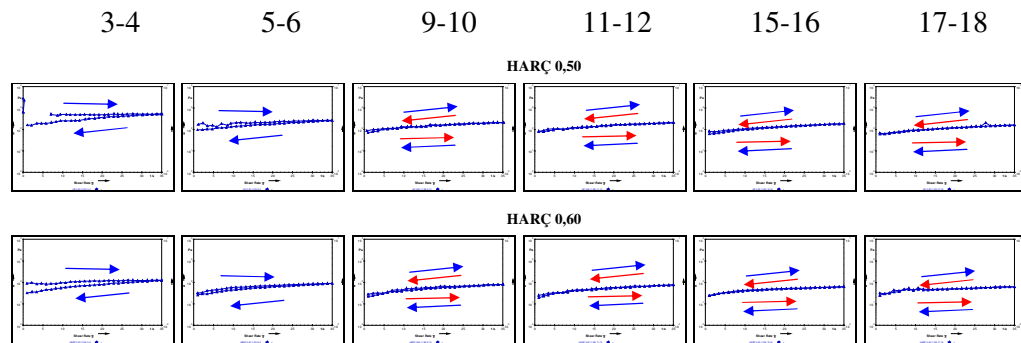
* Histeresiz çemberi karma davranış gösteren karışımlar

** %2 PP ve %2 YYPE lifli mikro betonlarda lif kilitlemesi nedeniyle histeresiz çemberi alınacak eğri elde edilememiştir.

*** Koehler ve Fowler (2004)'e göre + tiksotropik, - anti tiksotropik davranışı simgelemektedir.

Ön karıştırma ve dinlenmeler (1-2. bölüm, 7-8. bölüm, 13-14. bölüm) sonrası ilk gidiş dönüş hareketlerinde, histeresiz alanları çoğunlukla ikinci gidiş-dönüş hareketinden daha büyüktür (Tablo 3.23). Bu durum sürekli deformasyon etkisi altında kalan karışımlarda, gidiş ve dönüş sırasında davranışın birbirine yaklaşması ile açıklanabilir. Bu yaklaşma derecesi, mikro betonlarda polikarboksilat katkı zincirlerinin zamanla akış yönünde yönlenmesi nedeniyle daha belirgindir.

Çimento harçlarının akma eğrilerinden elde edilen histeresiz alanları Şekil 3.69’da verilmiştir. Başlangıçta bilyenin zorlandığı ön bölümler haricindeki kısımlarda karma bir histeresiz alanı söz konusudur. Histeresiz alanlarının sözü edilen ön bölümlerden sonra, çıkış ve iniş akma eğrileri iç içe geçtiği için oldukça düşük değerler aldığı görülebilir (Tablo 3.23). Bilye hareketlendikten sonra, kum tanecikleri çimento hamurundaki mikronize taneler arası elektrostatik etkileşimi kırdığı için, deformasyon hızı artış ve azalışındaki farklılaşma ortadan kalkmaktadır. Böylece histeresiz çemberini oluşturacak iniş ve çıkış eğrileri iç içe geçmekte, birbirine çok yakın bir şekilde oluşmaktadır (karma davranış). ***Bu nedenle tiksotropi, iri tanecikli sistemlerin reolojik davranışında daha az etkili olmaktadır.*** Uygulamada da tiksotropinin yol açabileceği yalancı soğuk derz problemi iri taneli sistemlerde daha az gözlenmektedir.



Şekil 3.69 Çimento harcı karışımlarının histeresiz çemberleri.

3.4.8 Sabit Deformasyon Hızında Viskozitenin Zamana Bağlı Değişiminin İncelenmesi (Tiksotropi)

Akma eğrisi elde etmeye yönelik olarak yapılan çalışmalarda deformasyon hızı farklı zaman aralıklarında arttırılıp azaltılarak, söz konusu deformasyon hızlarında

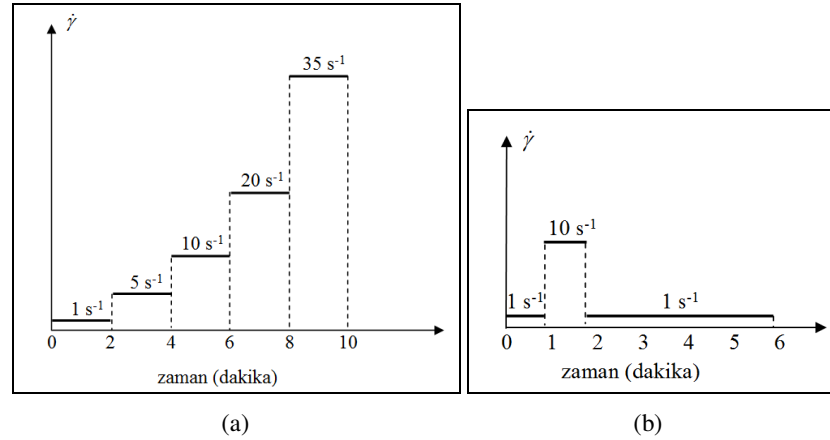
anlık kayma gerilmesi ve anlık viskozite değerleri çıkartılmıştı. Bu bölümde ise sabit deformasyon hızlarında belli süreler bekleme ile viskozitenin nasıl değiştiği araştırılmıştır. Bu incelemeleri yapmanın üç amacı bulunmaktadır:

- Farklı seviyelerde ancak sabit deformasyon hızlarında zamana bağlı olarak viskozitenin değişiminden yararlanılarak, bir karışımın tiksotropik, reopektik ya da Newtonyen davranışını sabit deformasyon hızında modellemek,
- Ani deformasyon hızı değişimlerine karşı, karışımın nasıl direnç gösterdiğini inceleyerek pompalama öncesinde ve sonrasında karışımların davranışını yorumlamak,
- Deformasyon hızı seviyesini değiştirmenin, yani farklı hızlarda karıştırmanın davranışa etkisini incelemek amaçlanmıştır.

Denemelerde üç tip çimento hamuru (ÇH 0,325 – ÇH 0,300 ve ÇH 0,275), iki tip harç (Harç 0,50 – 0,60), üç tip lifsiz mikro beton (MB %1,0 – MB %1,2 ve MB %1,4) ve iki tip lifli mikro beton (MB-PVA %1, MB-PP %1) olmak üzere on farklı karışım kullanılmıştır. Bu karışımlar, akma eğrisi incelemelerinde sorunsuz olarak çalışılan karışımlardır. Viskozitenin zamana bağlı olarak değişimini incelemek için iki farklı yöntem, ayrı ayrı tüm karışımlara uygulanmıştır. Yöntemlerin grafiksel gösterimi Şekil 3.70’de verilmiştir. İlk yöntemde bilye, karışım için $1s^{-1}$ ’lik sabit deformasyon hızında 2 dakika dönmekte, sonra aniden deformasyon hızı $5s^{-1}$ ’e çıkarılıp 2 dakika daha dönmektedir (Şekil 3.70a). Bu şekilde deformasyon hızı $10s^{-1}$, $20s^{-1}$ ve $35s^{-1}$ ’e çıkartılıp, her birinde ikişer dakika boyunca 20’şer adet veri alınmaktadır. Deney toplam 10 dakikalık sürede tamamlanmaktadır.

İkinci yöntemde deformasyon hızının aniden arttırıldıktan sonra, tekrar azaltılmasının viskoziteyi nasıl değiştirdiği incelenmiştir. Önce bilye 45 saniye boyunca düşük bir sabit deformasyon hızında ($1s^{-1}$) döndürülmüştür. Bu bölümde son 25 saniyede 5 noktadan ölçüm alınmıştır. Ardından deformasyon hızı aniden $10s^{-1}$ çıkartılıp 50s boyunca viskozite değişimi izlenmiştir. Son olarak deformasyon hızı tekrar düşürülerek ($1s^{-1}$) 250 saniye boyunca ölçüm alınmıştır. Deneyin tamamlanma süresi yaklaşık 6 dakikadır (Şekil 3.70b). İkinci yöntemde kullanılan model,

boyaların tiksotropik davranışının karakterize edildiği standart bir yöntemin modifiye edilmiş halidir (Rheoplus Software Manual, 2006). Boyaların duvara sürüldükten sonraki akma dirençleri bu yöntemle incelenmektedir.



Şekil 3.70 Viskozitenin zamana bağlı olarak değişimini incelemek için kullanılan yöntemler a) Sabit deformasyon hızı kademeli olarak arttırılıyor b) Sabit deformasyon hızı önce arttırılıp sonra azaltılıyor.

3.4.8.1 Birinci Yöntemin Uygulanması ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Birinci yöntemin uygulanması sonucu elde edilen ham verilerin bulunduğu viskozite-zaman grafikleri gruplar halinde Şekil 3.71a-d’de verilmiştir. Ham verilerin analizi için farklı matematiksel ifadeler incelenmiş ve bunlardan davranışa en uygun olan ikinci derece logaritmik polinom seçilmiştir:

$$\ln(\eta) = \ln(a) + b \cdot \ln(t) + c \cdot \ln(t) \cdot \ln(t) \quad (3.8)$$

η : anlık viskozite (Pa.s)

t: süre (s)

a, b ve c: Model katsayıları

Analizler sonucu elde edilen model katsayıları, tüm deformasyon hızı aralıkları için Tablo 3.24’de listelenmiştir. Ayrıca model eğrileri de Şekil 3.72’de noktalar üzerine çizilmiştir.

Şekil 3.71a'da 10 dakikalık süre boyunca çimento hamurlarının uygulanan deformasyon hızlarındaki viskozite değişimleri görülmektedir. En düşük deformasyon hızının ($1s^{-1}$), 2 dakika uygulanması ile viskozite tüm karışımlarda hızla azalmıştır. Bu süre sonunda, deformasyon hızının aniden $5s^{-1}$ 'e çıkartılması anında, tüm karışımlarda viskozitenin aniden düştüğü görülmektedir. Bu düşüş ani hareketlenme ile çimento tanecikleri arasında bağların kopmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca çimento hamuru karışımları farklı sabit deformasyon hızı uygulama aralıklarında, zamana bağlı olarak tiksotropik veya reopektik davranış gösterebilmektedir (Şekil 3.71a). Davranışlar S/Ç oranına bağlı olarak değişmektedir. Düşük sabit deformasyon hızı uygulama aralıklarında, viskozite zamanla azalırken (tikotropik davranış), yüksek sabit deformasyon hızı uygulama aralıklarında viskozitenin zamana bağlı olarak sabit kaldığı (Newtonyen) veya arttığı (reopektik) görülmektedir. *Bu sonuç deformasyon hızı seviyesinin çimento hamurunun reolojik davranışını değiştirdiğini ispatlamaktadır.* Çimento hamuru tiksotropik, reopektik veya Newtonyen davranır gibi genellemeler ancak deformasyon hızı ve reolojik ölçüm koşulları tanımlandığında anlam kazanacaktır.

Şekil 3.71b'de iki farklı S/Ç oranındaki harç karışımlarının zamana bağlı viskozite değişimleri görülmektedir. Tüm deformasyon hızı aralıklarında tiksotropik davranış hakim olup, deformasyon hızının aniden arttırıldığı geçiş noktalarında da viskozitenin düştüğü belirlenmiştir. Burada kum taneciklerinin çimento hamurlarında zaman zaman yüksek deformasyon hızlarında gözlenen reopektik yapıyı ortadan kaldırdığı görülmektedir. Kum taneciklerinin hacimce yüksek oranda olması ve hamur fazında yarattıkları sürtünme etkisi çimento taneleri arasındaki etkileşimi büyük ölçüde ortadan kaldırmıştır. Deformasyon hızı artış noktalarında da viskozitenin düşmesi, çimento harçlarının sakızlanamayarak kesikli davranış gösterdiğinin bir göstergesidir.

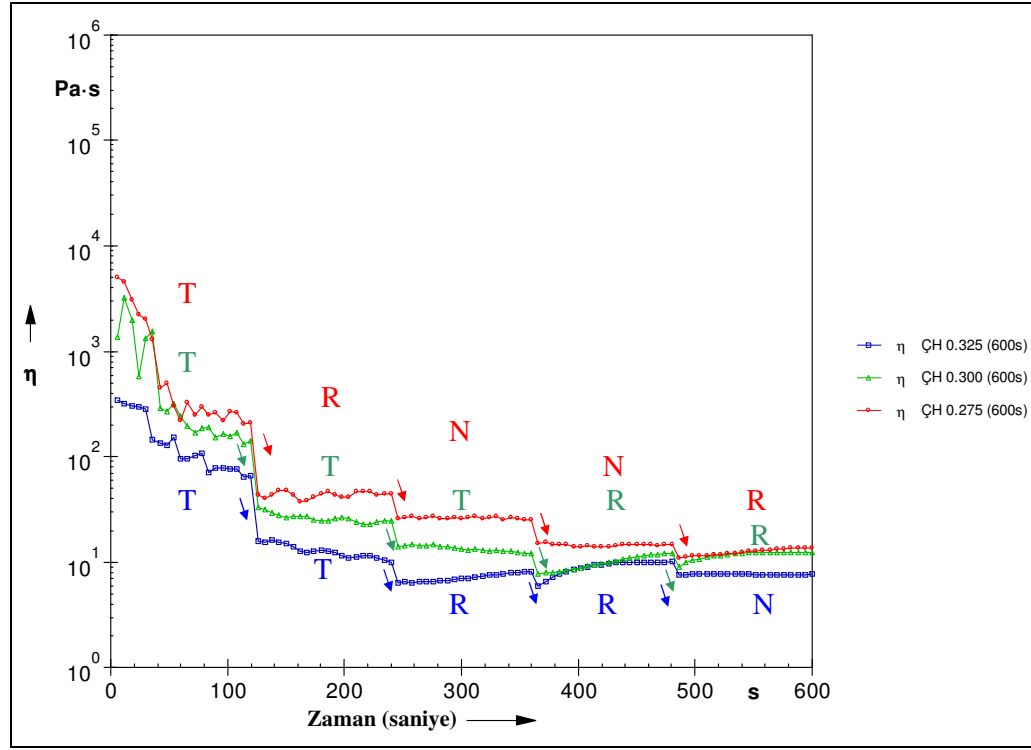
Lifsiz mikro betonların incelendiği Şekil 3.71c'de çimento hamuru ve harçtan daha farklı davranışlar söz konusudur. Katkı dozajı en düşük olan kohezif kıvamlı MB 1,0 karışımında, başlangıçta bilyenin düşük deformasyon hızında harekette zorlandığı, yüksek ve dalgalanan viskozite değerlerinin ölçüldüğü görülmektedir.

Bilyenin turunu tamamlaması ile deformasyon hızı değişim noktası yakın zamana denk geldiği için (yaklaşık 2 dakika) bu anda ani bir viskozite düşüşü söz konusudur. Daha sonra 5 s^{-1} 'lik deformasyon hızında da 2 dakika boyunca viskozite dalgalanarak azalmıştır (tikotropi) belirlenmiştir. Geçiş noktalarında ise viskozite az da olsa düşmektedir. Benzer davranış deney sonuna kadar devam etmiş ancak viskozitedeki dalgalanma azalmıştır. Katkı dozajının %1,2 olduğu kendiliğinden yerleşen kıvamdaki mikro betonda da başlangıçtaki düşük deformasyon hızı uygulamalarında, viskozite düşüşü meydana gelmektedir (Şekil 3.71c). Ancak bu düşüş çok küçük mertebelerdedir. Geçiş noktasında ilginç şekilde viskozitenin aniden yükseldiği ve bu durumun tüm deney boyunca tekrarlandığı görülmüştür. MB 1,4 karışımında da benzer bir davranış söz konusudur (Şekil 3.71c). *Mikro betonun deformasyon hızlarındaki ani değişime karşı anlık bir direnç oluşturduğu, ancak zamanla bu direncin azaldığı söylenebilir.* Çimento hamuru ve harç karışımlarında ise geçiş bölgesinde tam tersi olarak, ani bir çözülme davranışı gözlenmektedir. MB 1,0'da da geçiş noktalarında az da olsa viskozite azalması olması, ani direnç mekanizması için gerekli olan katkı dozajının yetersizliğine bağlanmaktadır. Kendiliğinden yerleşen mikro betonun yüksek deformasyon hızlarında viskozitesinin yükselmesi *dinamik stabilitesi açısından avantaj sağlamaktadır.*

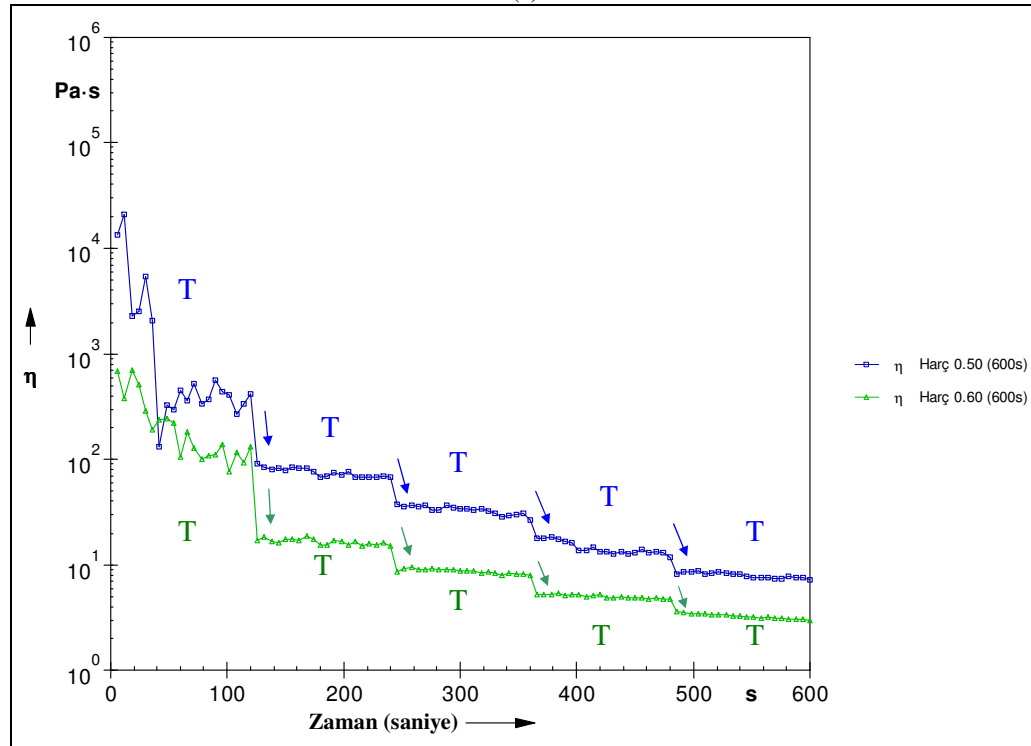
Lifli mikro betonların davranışlarının incelendiği Şekil 3.71d'de PVA ve PP lifli karışımların yanı sıra, bu karışımların lifsiz matrisinin (MB 1,2) de viskozite grafiği verilmiştir. Lifli karışımlarda anlık viskozite değerleri lifsiz matrise kıyasla daha yüksektir. Lifler mikro betonun viskozitesinin sabit deformasyon hızında zamana bağlı olarak değişmesini engellemiş, ölçülen viskozite değerlerinin dalgalanmasına neden olmuştur. Bu dalgalanma yüksek deformasyon hızlarında bile devam etmiştir. Aynı zamanda deformasyon hızı değişimi, geçiş noktalarında da ani değişikliklerin mertebesini azaltmışlardır. *Liflerin ani deformasyon hızı değişimlerinde, akıcılıkta sürekliliği sağlamada etkili olmaları matriste kayma gerilmesinin etki alanını yaymaları ile açıklanabilir.* Bu geçiş noktalarından ilk ikisinde (1-5, 5-10) viskozite azalırken, sonrakilerde artma gözlenmiştir. Lifin PP ve PVA olması elde edilen eğrileri çok fazla değiştirmemiştir.

Tablo 3.24 İlk yöntemle elde edilen veriler kullanılarak hazırlanan model katsayıları

Fonksiyonun geçerli olduğu deformasyon hızı aralığı	Karışım kodu	Model katsayıları
1s ⁻¹	ÇH 0,325 (600s) 2nd LP1	a = 259,13; b = 0,51088; c = -0,17083
5s ⁻¹	ÇH 0,325 (600s) 2nd LP2	a = 15232; b = -2,0304; c = 0,12759
10s ⁻¹	ÇH 0,325 (600s) 2nd LP3	a = ∞; b = -16,233; c = 1,4866
20s ⁻¹	ÇH 0,325 (600s) 2nd LP4	a = 0; b = 140,29; c = -11,477
35s ⁻¹	ÇH 0,325 (600s) 2nd LP5	a = 0; b = 13,371; c = -1,0643
1s ⁻¹	ÇH 0,300 (600s) 2nd LP1	a = 1,372,4; b = 0,76358; c = -0,2732
5s ⁻¹	ÇH 0,300 (600s) 2nd LP2	a = 1,4674*10 ⁻¹² ; b = -9,1598; c = 0,84471
10s ⁻¹	ÇH 0,300 (600s) 2nd LP3	a = 0; b = 11,766; c = -1,0755
20s ⁻¹	ÇH 0,300 (600s) 2nd LP4	a = 1,8595*10 ⁻⁷ ; b = -6,6125; c = 0,69802
35s ⁻¹	ÇH 0,300 (600s) 2nd LP5	a = 0; b = 145,37; c = -11,458
1s ⁻¹	ÇH 0,275 (600s) 2nd LP1	a = 35,997; b = -0,71742; c = -0,086548
5s ⁻¹	ÇH 0,275 (600s) 2nd LP2	a = 1,617*10 ⁶ ; b = -4,1454; c = 0,40743
10s ⁻¹	ÇH 0,275 (600s) 2nd LP3	a = 0; b = 11,049; c = -0,97723
20s ⁻¹	ÇH 0,275 (600s) 2nd LP4	a = ∞; b = -32,568; c = 2,6932
35s ⁻¹	ÇH 0,275 (600s) 2nd LP5	a = 0; b = 15,596; c = -1,1476
Fonksiyonun geçerli olduğu deformasyon hızı aralığı	Karışım kodu	Model katsayıları
1s ⁻¹	Harç 0,50 (600s) 2nd LP1	a = 4,04*10 ⁶ ; b = -3,2466; c = 0,26095
5s ⁻¹	Harç 0,50 (600s) 2nd LP2	a = 16,375; b = -1,6486; c = 0,11746
10s ⁻¹	Harç 0,50 (600s) 2nd LP3	a = 0; b = 21,827; c = -1,9766
20s ⁻¹	Harç 0,50 (600s) 2nd LP4	a = ∞; b = -77,282; c = 6,2765
35s ⁻¹	Harç 0,50 (600s) 2nd LP5	a = 0; b = 10,859; c = -0,92711
1s ⁻¹	Harç 0,60 (600s) 2nd LP1	a = 958,02; b = 0,04871; c = -0,11463
5s ⁻¹	Harç 0,60 (600s) 2nd LP2	a = 0,003162; b = 3,5042; c = -0,3571
10s ⁻¹	Harç 0,60 (600s) 2nd LP3	a = 0; b = 18,128; c = -1,6224
20s ⁻¹	Harç 0,60 (600s) 2nd LP4	a = 1,61*10 ⁻⁹ ; b = 7,6831; c = -0,67284
35s ⁻¹	Harç 0,60 (600s) 2nd LP5	a = 1,04*10 ¹⁶ ; b = -10,577; c = 0,77909
Fonksiyonun geçerli olduğu deformasyon hızı aralığı	Karışım kodu	Model katsayıları
1s ⁻¹	MB 1,4 (600s) 2nd LP1	a = 15,411; b = 0,098363; c = -0,02341
5s ⁻¹	MB 1,4 (600s) 2nd LP2	a = ∞; b = -31,439; c = 2,9842
10s ⁻¹	MB 1,4 (600s) 2nd LP3	a = ∞; b = -33,836; c = 2,914
20s ⁻¹	MB 1,4 (600s) 2nd LP4	a = ∞; b = -78,277; c = 6,3897
35s ⁻¹	MB 1,4 (600s) 2nd LP5	a = ∞; b = -77,664; c = 6,0636
1s ⁻¹	MB 1,2 (600s) 2nd LP1	a = 138,95; b = -0,1444; c = -0,0128
5s ⁻¹	MB 1,2 (600s) 2nd LP2	a = ∞; b = -38,075; c = 3,5746
10s ⁻¹	MB 1,2 (600s) 2nd LP3	a = ∞; b = -49,544; c = 4,3169
20s ⁻¹	MB 1,2 (600s) 2nd LP4	a = ∞; b = -27,944; c = 2,2413
35s ⁻¹	MB 1,2 (600s) 2nd LP5	a = ∞; b = -132,33; c = 10,316
1s ⁻¹	MB 1,0 (600s) 2nd LP1	a = 537,56; b = 1,6597; c = -0,2043
5s ⁻¹	MB 1,0 (600s) 2nd LP2	a = 3,7513*10 ¹⁵ ; b = -11,614; c = 1,1001
10s ⁻¹	MB 1,0 (600s) 2nd LP3	a = 23,663; b = -2,0334; c = 0,2012
20s ⁻¹	MB 1,0 (600s) 2nd LP4	a = ∞; b = -61,375; c = 5,1093
35s ⁻¹	MB 1,0 (600s) 2nd LP5	a = 0; b = 75,176; c = -6,0548
Fonksiyonun geçerli olduğu deformasyon hızı aralığı	Karışım kodu	Model katsayıları
1s ⁻¹	MB %1,2 (600s) 2nd LP1	a = 138,95; b = -0,1444; c = -0,0128
5s ⁻¹	MB %1,2 (600s) 2nd LP2	a = ∞; b = -38,075; c = 3,5746
10s ⁻¹	MB %1,2 (600s) 2nd LP3	a = ∞; b = -49,544; c = 4,3169
20s ⁻¹	MB %1,2 (600s) 2nd LP4	a = ∞; b = -27,944; c = 2,2413
35s ⁻¹	MB %1,2 (600s) 2nd LP5	a = ∞; b = -132,33; c = 10,316
1s ⁻¹	PVA%1 (600s) 2nd LP1	a = 222,83; b = 0,54219; c = -0,1042
5s ⁻¹	PVA%1 (600s) 2nd LP2	a = ∞; b = -19,003; c = 1,7898
10s ⁻¹	PVA%1 (600s) 2nd LP3	a = 3,4316*10 ⁸ ; b = -5,0247; c = 0,40744
20s ⁻¹	PVA%1 (600s) 2nd LP4	a = ∞; b = -53,671; c = 4,3777
35s ⁻¹	PVA%1 (600s) 2nd LP5	a = ∞; b = -34,488; c = 2,7016
1s ⁻¹	PP%1 (600s) 2nd LP1	a = 78,87; b = 0,88915; c = -0,1386
5s ⁻¹	PP%1 (600s) 2nd LP2	a = 2,5824*10 ⁻¹⁰ ; b = -6,7779; c = 0,57764
10s ⁻¹	PP%1 (600s) 2nd LP3	a = ∞; b = -53,797; c = 4,7805
20s ⁻¹	PP%1 (600s) 2nd LP4	a = 0,18835; b = 2,3926; c = -0,23757
35s ⁻¹	PP%1 (600s) 2nd LP5	a = 4,9455*10 ⁸ ; b = -4,5797; c = 0,3315

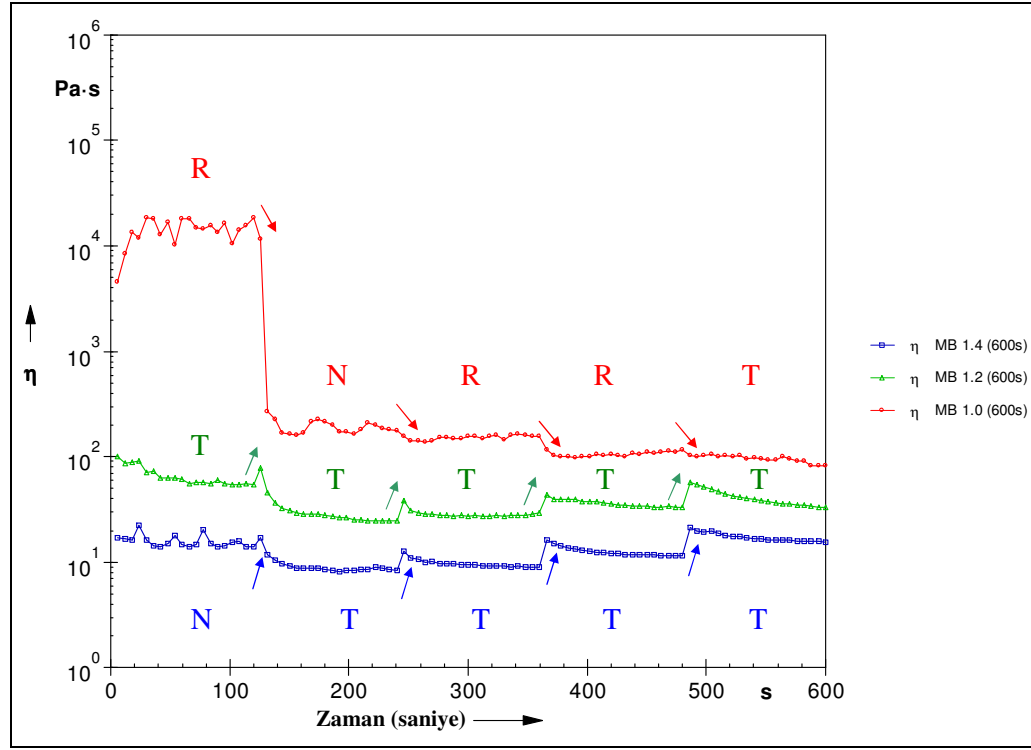


(a)

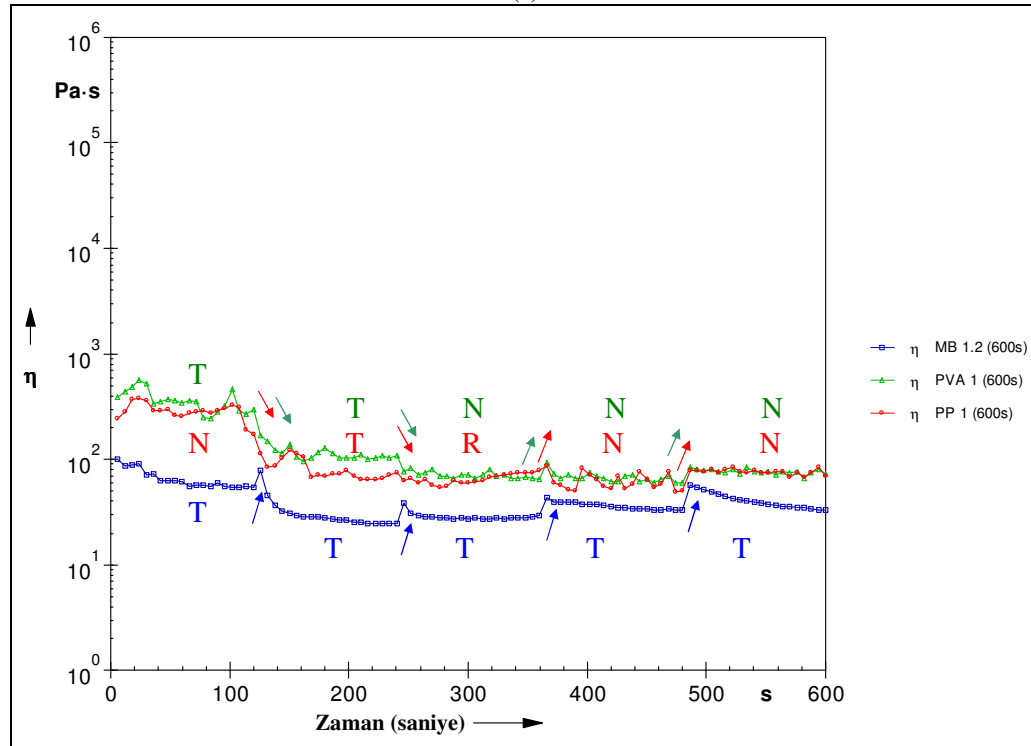


(b)

Şekil 3.71 Ham verilerle hazırlanan viskozite-zaman grafikleri, a) Çimento hamuru, b) Çimento harcı (T: Tiksotropik, R: Reopektik, N: Newtonyen).

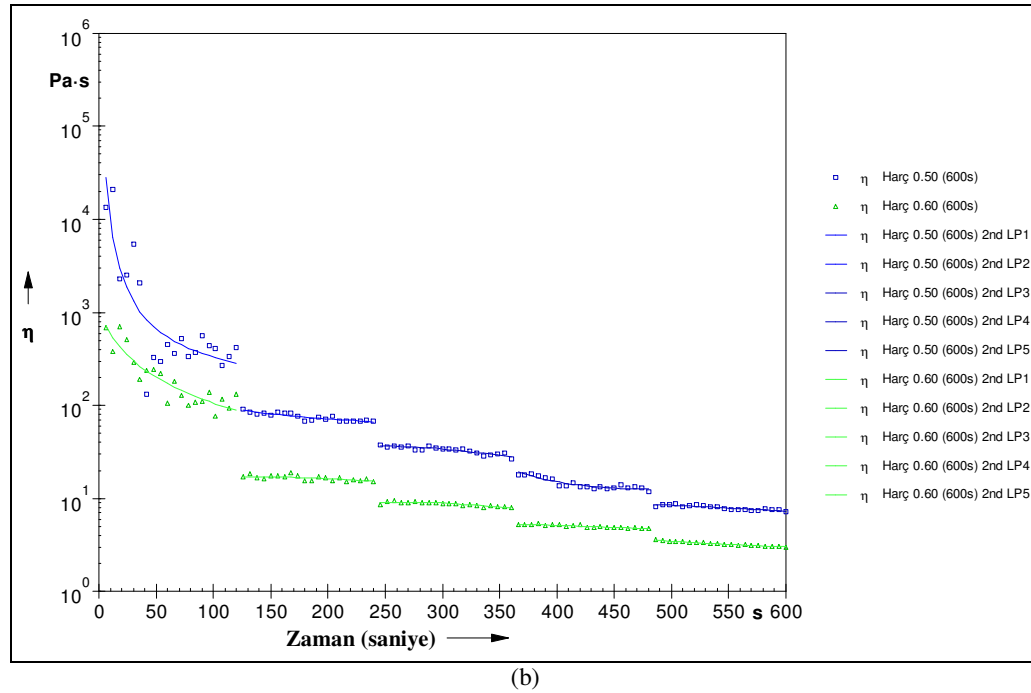
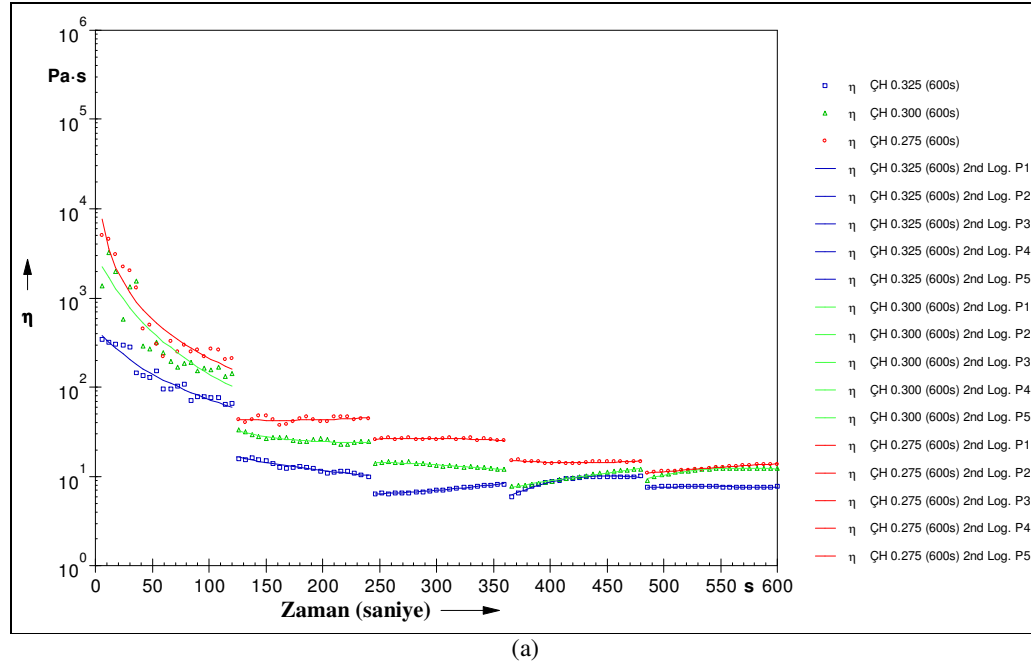


(c)

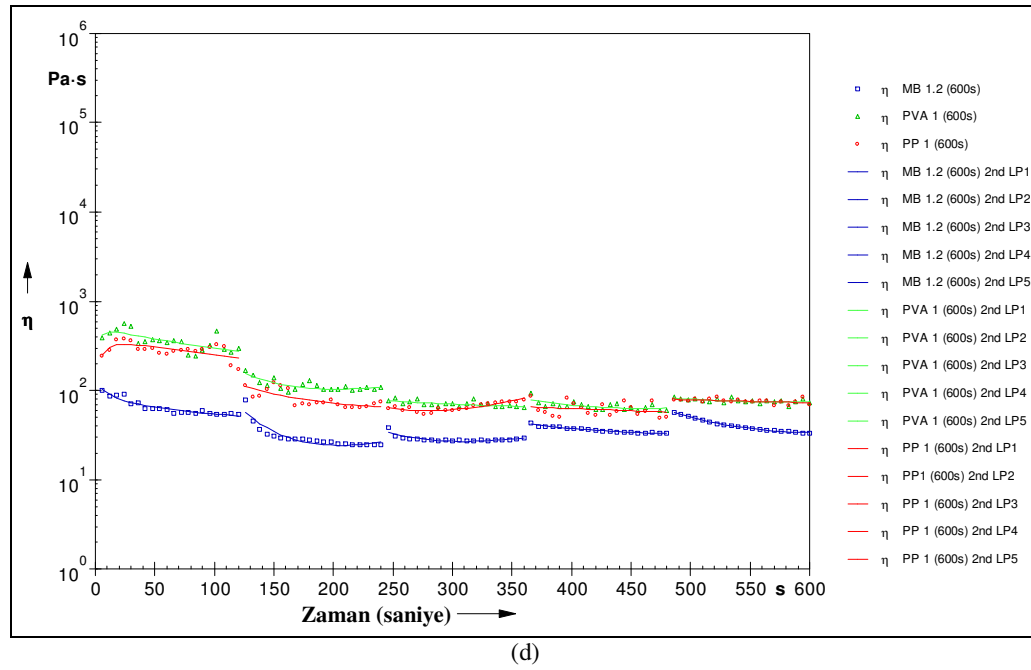
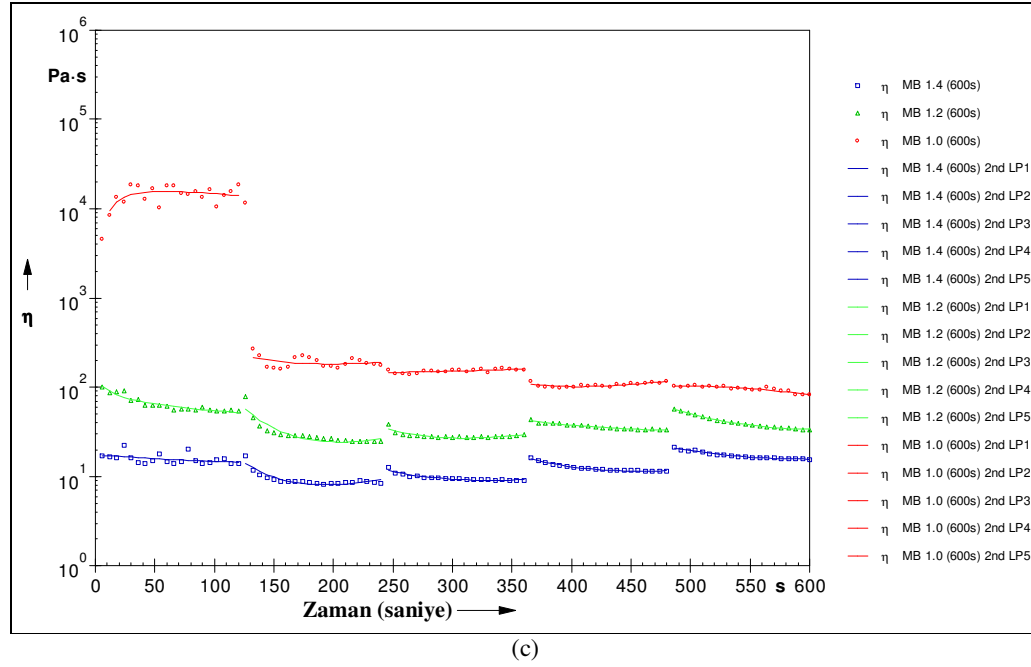


(d)

Şekil 3.71 Ham verilerle hazırlanan viskozite-zaman grafikleri, c) Lifsiz mikro beton, d) Lifli mikro beton (T: Tiksotropik, R: Reopektik, N: Newtonyen).



Şekil 3.72 Ham veriler üzerinde, 2. derece logaritmik polinom modeli eğrileri, a) Çimento hamuru, b) Çimento harcı.

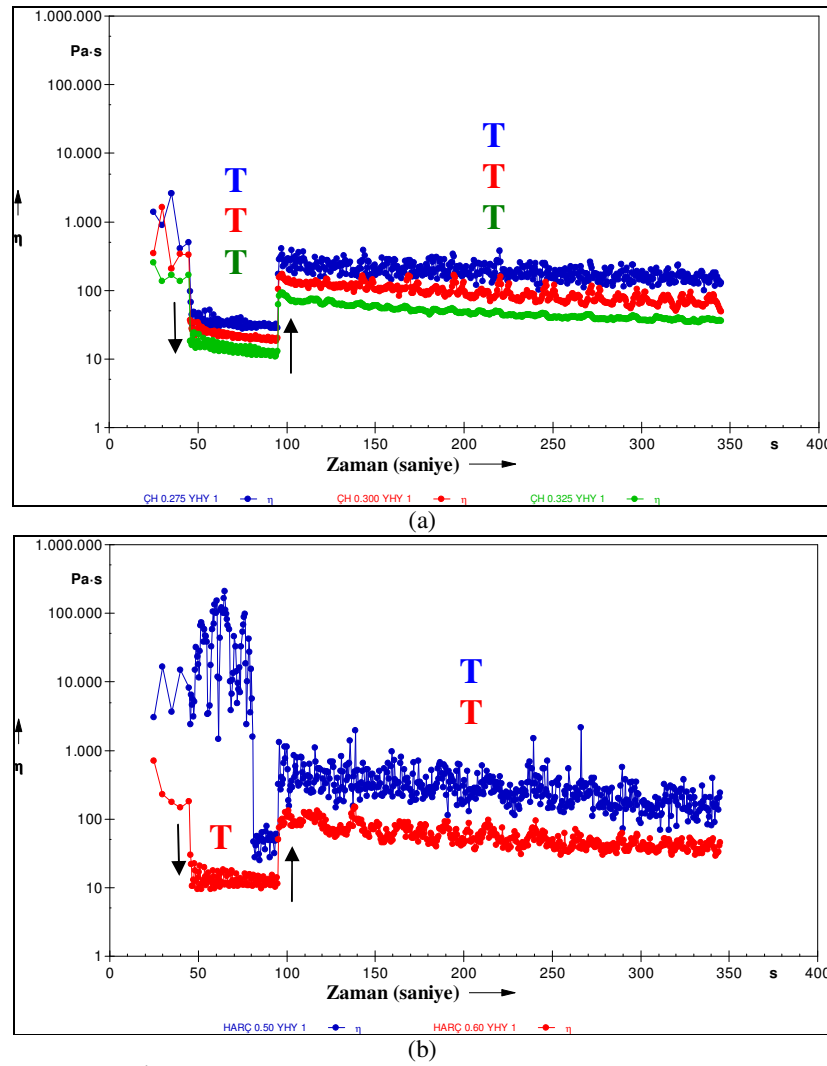


Şekil 3.72 Ham veriler üzerinde, 2. derece logaritmik polinom modeli eğrileri, c) Lifsız mikro beton, d) Lifli mikro beton, (MB1,2 son sette karşılaştırma amaçlı olarak tekrar verilmiştir).

Şekil 3.72a-d'de 2. derece logaritmik polinom fonksiyonları ve model eğrileri, analiz noktaları ile birlikte verilmiştir. Grafikler incelendiğinde eğri uyumunun

3.4.8.2 İkinci Yöntemin Uygulanması ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Şekil 3.70b’de verilen ikinci yöntem kullanılarak elde edilen grafikler sırasıyla çimento hamuru, harç, lifsiz ve lifli mikro betonlar için sırasıyla Şekil 3.73 ve 3.74’de verilmiştir.



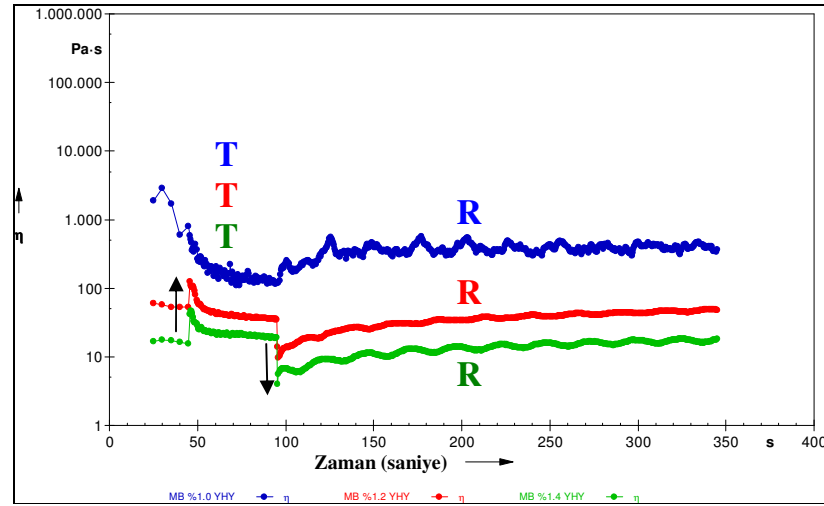
Şekil 3.73 İkinci yöntem kullanılarak hazırlanan viskozite-zaman grafikleri,
a) Çimento hamuru, b) Çimento harcı.

Şekil 3.73a ve 3.73b’de sunulan çimento hamuru ve harç karışımları için, Harç0,50 karışımı hariç, benzer bir davranış gözlenmiştir. Harç0,50 karışımı için de bilyenin düşük deformasyon hızında (1 s^{-1}) dönmekte zorlandığı, bir turunu ancak

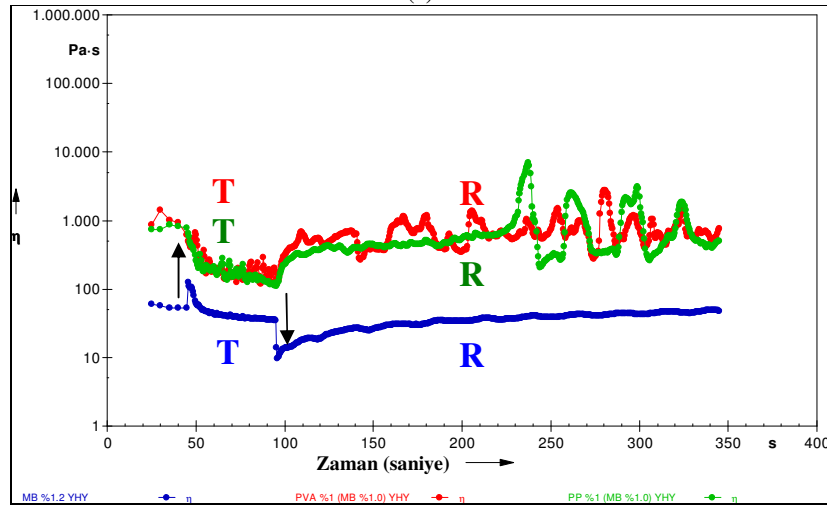
deneyin 80. saniyesinde tamamlayabildiği belirtilmelidir. Çimento hamuru ve harç karışımlarında ilk 45 saniyedeki düşük deformasyon hızında (1 s^{-1}) viskozite değerleri yüksek iken, deformasyon hızının aniden arttırıldığı (10 s^{-1}) 45. saniyede viskozite değerleri aniden düşmektedir (Şekil 3.73a, 3.73b). Bu deformasyon hızındaki bekleme süresi boyunca da, viskozitede hafif de olsa bir azalma söz konusudur. Daha sonra deformasyon hızı yeniden ani olarak düşürüldüğünde (95. saniye) viskozitenin ani olarak arttığı belirlenmiştir. Viskozite değerleri, devam eden sabit düşük deformasyon hızında yavaş yavaş azalmaktadır. Bu süre zarfında, harç karışımlarında kum taneciklerinin matriste yarattığı değişkenlik nedeniyle, viskozite değerleri çimento hamuru karışımlarından daha çok dalgalanmaktadır. Çimento hamuru ve harç karışımlarında sabit deformasyon hızında viskozite sürekli düşme eğiliminde iken, ani deformasyon hızı değişimlerinde, değişime boyun eğen (*deformasyon hızı ani arttırılınca viskozitesi azalan, ani azaltılınca viskozitesi tekrar artan*) bir davranıştır. Deformasyon hızı seviyesinin kademeli olarak arttırıldığı bir önceki çalışmada, çimento hamuru karışımlarının bazıları çok yüksek deformasyon hızı seviyelerinde reopektik davranış da göstermiştir. Ancak tüm deformasyon hızı seviyesi artışlarında şu anda incelenmekte olan seride olduğu gibi viskozitede ani düşüş meydana gelmiştir (Şekil 3.73a, 3.73b).

Şekil 3.74a, 3.74b’de lifsiz ve lifli mikro beton karışımlarının grafikleri verilmiştir. Düşük deformasyon hızının uygulandığı ilk 45 saniyeden sonra, ani deformasyon hızı artışı viskozite değerlerini de aniden arttırmaktadır. Bu durum MB1,0 karışımında çok belirgin değilken (hatta azalma var), MB1,2 ve MB1,4 karışımlarında net bir şekilde görülmektedir. Lifli serilerde ise, ani deformasyon değişiminin yarattığı etki lifler tarafından sönmülmüştür. Daha sonraki 50 saniye boyunca deformasyon hızı 10 s^{-1} ’de sabit iken, viskozite değerleri istisnasız tüm serilerde azalmaktadır. Deformasyon hızının tekrar aniden azaltıldığı 95. saniyede MB1,2 ve MB1,4 karışımlarının viskoziteleri ani olarak azalmakta, diğer serilerde artmaktadır. Bu değişimi izleyen süre boyunca, düşük *deformasyon hızındaki davranış tüm karışımlarda zamanla viskozite artması şeklinde* olmuştur. Lifli mikro betonlarda, harç karışımlarında olduğu gibi viskozitede büyük dalgalanmalar gözlenmiştir. *Genel olarak mikro beton karışımlarında, yavaş karıştırma sırasında*

viskozite artarken, hızlı karıştırma viskoziteyi azaltmaktadır. Ani deformasyon hızı değişimlerinde de, akıcı kıvamdaki mikro betonların (MB1,2 - MB1,4) davranışları değişime direnç gösterme yönünde olmuştur. Deformasyon hızı artışı ile viskozitede ani artış olmuş, deformasyon hızı azalması ile viskozitede ani düşüş olmuştur. Bu durum mikro betonların mevcut durumlarını koruma ve akma davranışında süreklilik gösterme özelliğinden kaynaklanmaktadır.



(c)



(d)

Şekil 3.74 İkinci yöntem kullanılarak hazırlanan viskozite-zaman grafikleri, a) Lifsiz mikro beton, b) Lifli mikro beton. (Karşılaştırma amacıyla MB1,2 grafiği lifli serilerle birlikte tekrar verilmiştir).

Barnes, Hutton ve Walters (1989), bu davranışı dış mekanik etki (kayma gerilmesi) nedeniyle geri dönüşümlü sol-jel (katı-sıvı) geçişi olarak tanımlamaktadır. Kayma gerilmesi etkisi altında, viskozitede zamana bağlı düşüş meydana gelir. Bunu, kayma gerilmesi kaldırıldığında viskozitenin zaman içinde tekrar artması izlemektedir. Ancak kayma gerilmesinin tamamen kaldırılması durumunda viskozite ölçülemeyeceği için, düşük deformasyon hızlarına inilerek bu inceleme yapılabilir. İkinci yöntemle incelenen mikro beton karışımları Barnes ve diğerlerinin (1989) tanımına uymaktadır.

3.4.9 Reolojik Karakterizasyonla İlgili Sonuçlar ve Genel Değerlendirme

Çimento bazlı kompozitlerin taze haldeki reolojik davranışları; “*karıştırma başlangıcında*” ve “*akış hareketi sırasında*” farklılık göstermektedir. Reolojik parametrelerin söz konusu aşamalarda ölçümü, farklı yöntemlerle gerçekleştirilmekte olup, statik ve dinamik olarak iki gruba ayrılması mümkündür. Hem statik hem de dinamik reolojik parametreler çimento bazlı kompozitler için geliştirilen “bilyeli reometre sistemi” ile ölçülebilmektedir.

Bilyeli reometrelerle, cihaz konfigürasyonunun izin verdiği geniş bir kayma gerilmesi aralığında (0-2850 Pa), farklı deformasyon hızlarında (0-35s⁻¹), en büyük tane boyutu 2 mm’ye kadar olan her türlü malzemeyi incelemek mümkündür. Yaklaşık 400 cm³ hacimde malzeme analiz için yeterlidir.

Bilyeli reometrelerle belli bir dozaja ve uzunluğa kadar polimerik lifli kompozitlerin incelenmesi mümkünse de yüksek lif dozajlarında akış yönünde kilitlemeler nedeniyle ölçüm alınamamaktadır.

Göreceli olarak kuru kıvamlı karışımların düşük deformasyon hızlarında karıştırma başlangıcındaki davranışları bilyeli reometre ile incelenebilir.

3.4.9.1 Statik Reolojik Parametrelerle İlgili Sonuçlar

- Akışkanlaştırıcı katkı ilavesi mikro betonların hem statik EKG değerini hem de başlangıç viskozitesini azaltmaktadır. S/Ç oranı artışı da, çimento hamurlarının statik EKG değerinde ve başlangıç viskozitesinde azalmaya neden olmaktadır. Ancak akışkanlaştırıcı katkı ilavesi, statik EKG değerini azaltmada, su ilavesine kıyasla çok daha etkilidir. Hem karıştırma hem de yerleştirme açısından avantaj sağlayan bu durum, su ilavesi yerine katkı ilavesi ile EKG değerini düşürmenin etkinliğini göstermektedir.
- Mikro betona lif ilavesi statik EKG değerini 2-3 kat arttırmaktadır. Bilyenin sürüklenme sırasında maruz kaldığı gerilmeyi arttıran lifler başlangıç hareketini güçleştirmekte, karıştırmayı zorlaştırmaktadır. Akışkanlaştırıcı kullanımı sayesinde liflerin işlenebilirliğe olumsuz etkisi önemli derecede azaltılmış, yüksek S/Ç oranlı çimento hamuru veya S/Ç oranı 0,60 olan harç karışımlarına yakın statik EKG değerlerine ulaşılmıştır.
- Başlangıç viskozitesi 20000-200000 Pa.s aralığında olan çimento hamuru karışımlarında S/Ç oranı artışı ile viskozite değerinde 10 kat azalma meydana gelmiştir. Ancak yine de düşük deformasyon hızlarında ölçülen başlangıç viskozitesi değerleri 20000 Pa.s gibi oldukça yüksek seviyelerdedir. İlk anda akmaya karşı gösterdikleri direnç, düşük deformasyon hızlarında yüksektir.
- Çimento harçlarının başlangıç viskozitesi değerleri, bünyelerinde bulunan kumun etkisi nedeniyle oldukça yüksektir. Karışımın S/Ç oranı arttırılsa bile karışımda bulunan yüksek kum oranı başlangıç viskozitesini olumsuz etkilemektedir.
- Mikro betonlarda akışkanlaştırıcı ilavesi ile başlangıç viskozitesinin önemli derecede azaldığı, düşük deformasyon hızlarına rağmen 400 Pa.s'ye ye kadar düştüğü belirlenmiştir.

- Mikro betona lif ilavesi statik EKG değerine benzer şekilde başlangıç viskozitesini de lifsiz duruma göre arttırmıştır. Bilyenin sürüklenmesine direnç gösteren liflerin başlangıç viskozitesini arttırma mekanizmaları statik EKG’dekine benzerlik göstermektedir.

3.4.9.2 Dinamik Reolojik Parametrelerle İlgili Sonuçlar

- Herschel Bulkley modeli, kuru kıvamlı karışımlar dışındaki çimento bazlı kompozitlerin akış sırasındaki reolojik davranışını modellemede oldukça yararlı bulunmuştur. Bu modelle karışımların “dinamik EKG değerleri” ve yüksek deformasyon hızlarında “plastik viskozite” ile ilişkilendirilebilecek “nihai viskozite” değerleri belirlenebilmektedir.

- S/Ç oranına bağlı olarak çimento hamurlarının dinamik eşik kayma gerilmesinin 56-477 Pa ve nihai viskozitesinin de 6-19 Pa.s aralığında olduğu belirlenmiştir. Yüksek S/Ç oranına sahip çimento hamurları hareket halinde ayrışmaya eğilimli, durgun halde ise akmaya dirençli bir davranış göstermektedir.

- Çimento hamuru serilerinin hemen hemen tümünde deformasyon hızı artışı ile nihai viskozite değeri azalırken, mikro beton serilerinde deformasyon hızı artışı ile viskozitenin artma veya azalma eğiliminde olabileceği görülmüştür.

- Çimento hamuru karışımlarında durgun halde çimento tanecikleri arasında yüzey yüklerindeki farklılıklar nedeniyle topaklaşma eğilimi vardır. Başlangıçta yüksek olan EKG değerinden, benzer yüzey yüklerinin yarattığı çekim kuvvetleri sorumludur. Çimento hamuru karışımlarının harekete geçmesi ile birlikte sözü edilen gevrek bağ kuvvetleri kopmakta ve tanecikler arasında bir bağlantı kalmamaktadır. Böylece hareket halinde çimento hamuru karışımının viskozitesi çok düşük değerler almaktadır. Söz konusu bağ kuvvetlerinin, düşük deformasyon hızlarında kopmayacağı veya kopan bağların yeniden meydana geleceği dikkate alındığında, yüksek deformasyon hızlarının klasik çimento hamuru için ayrıştırıcı etkisi daha da belirginleşmektedir.

- Mikro betonların dinamik eşik kayma gerilmesi ise katkı dozajına bağlı olarak 5-15 Pa ve nihai viskozitesi de 20-40 Pa.s aralığındadır. Mikro betonlardan elde edilen dinamik EKG değerleri, çimento hamurundan çok daha düşüktür iken, nihai viskozite değerleri, çimento hamuru karışımlarından daha yüksektir (ÇH 0,250 hariç). Mikro betonlarda kullanılan polikarboksilat kökenli akışkanlaştırıcı katkı, dinamik EKG'yi düşürürken, nihai viskoziteyi (η_{inf}) yüksek deformasyon hızlarında bile yüksek tutmaktadır.

- Mikro betonda düşük eşik kayma gerilmesine rağmen, nihai viskozitenin yüksek deformasyon hızlarında bile yüksek kalması, kullanılan akışkanlaştırıcıya bağlanmıştır. Uzun yan zincirli polikarboksilat kökenli katkılar taneciklerin etrafını sararak, tanecikler etrafında sterik itki meydana getirmektedir. Hareket halinde mikro beton tanecikleri etrafındaki katkı zincirleri yönlendirilerek, dinamik EKG değerini düşürmektedir. Harekete dik yöndeki bağlı zincirler kopmaktadır. Ancak aynı anda tanecikler arasında kayma gerilmesinin daha az olduğu bölgelerde, polikarboksilat katkı zincirleri bağlayıcılık vazifesi görerek taneciklerin akışı topluca takip etmesine neden olmaktadır. Bu durum mikro betonlarda EKG'nin düşerken, viskozitenin neden yüksek kaldığını açıklamaktadır. Uygun katkı dozajının kullanılması halinde katkılı mikro betonlarda gözlenen “*sakızlanarak akma*” davranışı söz konusu mekanizmaya bağlanmıştır. Pasif bölgedeki katkıların, hareket halindeki tanecikler arasında köprüleme görevi üstlenerek, bilyenin kolayca sürüklenmesini engellemesi, viskozitenin korunmasını sağlamaktadır. Böylece mikro beton yüksek deformasyon hızlarında (pompalama gibi) stabilite açısından, katkısız çimento hamuruna kıyasla avantaj sağlamaktadır. Uygun dozaj aralıklarında çalışılırsa kendiliğinden yerleşebilirliğin anahtarı olan uygun plastik viskozite sağlanmış olacaktır.

- Kohezif mikro beton karışımlarında (MB 1,0) deformasyon hızı artışı ile viskozite azalırken, çok akıcı kıvamlı karışımda ise (MB 1,4) deformasyon hızı artışı ile viskozite artmaktadır. Katkı dozajı düşük olan mikro betonda çimento hamuruna benzer bir davranış gözlenmekte, tanecikler arası bağ için yeterli katkı bulunmamaktadır. Bu nedenle yüksek deformasyon hızlarında viskozitede düşme

meydana gelmektedir. Ancak her iki uç durum da problemlidir. İlk durumdaki düşük deformasyon hızlarında viskozite aşırı yükseleceğinden akamama sorunu, ikinci durumda ise düşük deformasyon hızlarında viskozite aşırı düşebileceğinden çökelme-ayrışma riski ortaya çıkabilir. Bu durumda akıcı halde stabiliteyi koruma açısından, katkı dozajının %1,2 olması en avantajlı durum olacaktır.

- Çimento harcının dinamik reolojik parametreleri incelendiğinde, S/Ç oranı 0,60 olan karışım için dinamik EKG değerinin 6 Pa ve nihai viskozite değerinin 2 Pa'a kadar düştüğü tespit edilmiştir. S/Ç oranı yüksek olan harçta, düşük viskoziteli çimento hamurunun agrega tanelerini şiddetli dinamik etki altında taşıyamadığı belirlenmiştir. Yüksek deformasyon hızlarında, çimento harcı ayrışmaya eğilimlidir.

- Mikro betona lif ilavesi tüm dinamik reolojik parametrelerde artışa neden olmaktadır. Liflerin sürüklenen bilyenin etki ettiği aktif gerilme bölgesini genişlettiği tespit edilmiştir. Bilyenin içinde sürüklendiği malzemede bulunan katı cisimlerin miktar, boyut ve geometrileri aktif gerilme alanını genişletmektedir. Uzun bir lif, bilyenin matraste etkileyeceği aktif alanı kısa bir life göre çok daha fazla arttırmaktadır. Benzer şekilde lif dozajı da arttıkça aktif alan artmaktadır.

3.4.9.3 Histeresiz Alanları ile İlgili Sonuçlar

- Akma eğrilerindeki deformasyon hızı çıkış ve iniş bölgeleri arasında kalan histeresiz alanları yardımıyla, farklı karışımların yapısal toparlanma (negatif alan) veya yapısal yumuşama (pozitif alan) davranışları karakterize edilebilir. Mikro betonlarda yapısal yumuşama davranışı baskın iken çimento hamurlarında yapısal toparlanma daha belirgindir. Aynı zamanda karma davranışın gözlemlendiği durumlar da söz konusudur.

- İri tanecikler içeren çimento harcı karışımlarında histeresiz alanı yok denecek kadar azalmaktadır. Akma eğrisinde çıkış ve iniş eğrilerinin üst üste binmesi, kum tanelerinin çimento hamurunda gözlenen tiksotropi etkisini ortadan kaldırdığını göstermektedir.

3.4.9.4 Sabit Deformasyon Hızında Zamana Bağlı Viskozite Değişimi ile İlgili Sonuçlar

- Çimento hamuru karışımları farklı sabit deformasyon hızı uygulama aralıklarında, zamana ve S/Ç oranına bağlı olarak tiksotropik veya reopektik davranış gösterebilmektedir. Düşük sabit deformasyon hızı uygulama aralıklarında, viskozite zamanla azalırken (tikotropik davranış), yüksek sabit deformasyon hızı uygulama aralıklarında viskozitenin zamana bağlı olarak sabit kaldığı (Newtonyen) veya arttığı (reopektik) görülmektedir. Bu sonuç, deformasyon hızı seviyesinin çimento hamurunun reolojik davranışını değiştirdiğini ispatlamaktadır. Çimento hamuru tiksotropik, reopektik veya Newtonyen davranır gibi genellemeler, ancak deformasyon hızı ve reolojik ölçüm koşulları tanımlandığında anlam kazanacaktır.

- Mikro betonun deformasyon hızlarındaki ani değişime karşı anlık bir direnç oluşturduğu, ancak zamanla bu direncin azaldığı söylenebilir. Çimento hamuru ve harç karışımlarında ise geçiş bölgesinde tam tersi olarak, ani bir çözülme davranışı gözlenmektedir. Kendiliğinden yerleşen mikro betonun yüksek deformasyon hızlarında bile, viskozitesinin yüksekliği mikro betonların mevcut durumlarını koruma ve akma davranışında süreklilik gösterme özelliğinden kaynaklanmaktadır. Bu durum karışımın dinamik stabilitesi açısından avantaj sağlamaktadır.

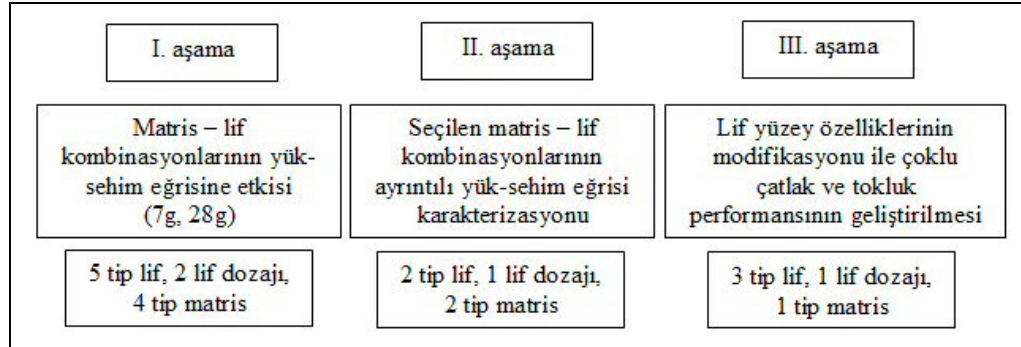
BÖLÜM DÖRT

MİKRO BETONUN TOKLUĞUNUN ve ÇOKLU ÇATLAK PERFORMANSININ GELİŞTİRİLMESİNE YÖNELİK ÇALIŞMALAR

Yüksek performanslı mikro beton tasarımında hedeflerden birisi de mikro betonun tokluk performansının geliştirilmesidir. Bu bölümde, sözü edilen hedef kapsamında yapılan çalışmalar üç ayrı aşamada sunulacaktır. Deney programının ana hatları Şekil 4.1’de şematize edilmiştir. İlk aşamada, farklı matrisler ve çeşitli lifler kullanılarak hazırlanan mikro beton kompozitlerin eğilme etkisi altında sehim davranışları incelenecektir. Çoklu çatlak potansiyelinin ve tokluk performansındaki gelişimin, kompozit tasarımında kullanılan lif ve matris açısından nasıl etkilendiği tartışılacaktır. Kompozitlerin yük-sehim performansları karşılaştırılarak, bazı matris-lif kombinasyonları seçimi yapıldıktan sonra ikinci aşamaya geçilecektir. İkinci aşama öncesinde farklı yük-sehim karakterlerine sahip üç karışım kullanılarak, değişik geometride örnekler (mini plakalar) hazırlanacak, bu örneklerin tek ve çift nokta yükleme sonucu elde edilen grafiklerinden örnek şekli ve yükleme koşulunun kompozit performansına etkileri tartışılacaktır.

İkinci aşamada seçilen bazı lif-matris kombinasyonları, daha çok sayıda örnek kullanılarak daha ayrıntılı incelenecektir. Güçlü ve zayıf liflerin, farklı matrislerdeki davranışları belirlenecektir. Matris-lif etkileşiminin lifin yüzey özellikleri açısından yarattığı değişiklikler tartışılacaktır.

Son aşamada ise çoklu çatlak potansiyelini arttırmak için, lif yüzeyi modifikasyonuna yönelik olarak gerçekleştirilen çalışmalar sunulacaktır. Lifin yüzey özelliklerinin plazma yöntemi ile modifikasyonu hakkında ön bilgiler sunulduktan sonra, üç farklı türdeki lifin yüzey özellikleri modifiye edilecektir. Yapılan yüzey işlemlerinin kompozit performansında ne gibi değişikliklere yol açtığı araştırılacak, meydana gelen değişikliklerin olası nedenleri tartışılacaktır.



Şekil 4.1 Mikro betonun tokluk performansını incelemeye ve geliştirmeye yönelik olarak gerçekleştirilen üç aşamalı deney programı akış şeması.

4.1 Mikro Beton Karışımlarında Kullanılan Malzemeler

Bu bölümde kullanılacak malzemelerden bazıları daha önceki bölümlerde de kullanılmış, bazıları ise bu bölümde kullanılmaya başlanacaktır. Daha önceki bölümlerle aynı malzemelerin kullanılması halinde, alt başlıklarda açıklama yapılacaktır.

4.1.1 Çimento

Çimento CEM I 42,5R sınıfı olup, Çimentaş Türk AŞ.'den temin edilmiştir. Deneyler çok geniş bir zaman dilimine yayıldığı için her aşamada kullanılan çimentolar aynı fabrikadan temin edilmesine rağmen analizleri arasında küçük farklılıklar gösterebilmektedir. Ancak bu farklılıklar çimento sınıfını etkilememektedir. Bu aşamada kullanılan çimentonun üretici firmadan alınan fiziksel ve kimyasal analizi Tablo 4.1'de verilmiştir.

4.1.2 Mikro Agregalar

Bu bölümdeki üç aşamada da Öztüre Kireççilik A.Ş. tarafından üretilen 100 mikron altı kireçtaşı tozu kullanılmıştır. Bir önceki reolojik incelemeler bölümünde kullanılan kireçtaşı tozu ile aynı malzemedir.

Farklı matrisler oluşturmak amacıyla, ikinci bir tür mikro agrega daha kullanılmıştır. Bu mikro agrega, silis kumunun öğütülmesi ile elde edilen silis tozudur. Aydınlar madencilik firması tarafından 25 kg'lık torbalar halinde seramik yapıştırıcı karışımlarında kullanılmak üzere piyasaya verilmektedir. Tane boyutu 500 mikron'un altındadır. Bu malzeme ilk aşamada mikro agregası silis tozu olan matrislerde kullanılmış olup, daha sonraki aşamalarda kullanılmamıştır.

Tablo 4.1 CEM I 42,5R tipi Portland çimentosunun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri.

Kimyasal analiz (%)		Karma bileşenler (Bogue %)			
CaO	63,70	C ₃ S	63,01	C ₃ A	10,16
SiO ₂	19,14	C ₂ S	3,89	C ₄ AF	9,13
Al ₂ O ₃	5,75	Basınç dayanımı (MPa)			
Fe ₂ O ₃	3,00	2 günlük			20,4
MgO	0,90	7 günlük			41,1
Na ₂ O	0,65	28 günlük			50,6
K ₂ O	0,83	Fiziksel özellikler			
SO ₃	2,78	Özgül ağırlık			3,12
Cl	0,001	Blaine yüzey alanı (m ² /kg)			336
Kızdırma kaybı	2,84	Hacim sabitliği (mm)			1
Serbest CaO	0,55	Kıvam suyu (%)			28,8
Çözünmeyen kalıntı	0,70	Priz başlangıç süresi (dakika)			135
		Priz bitiş süresi (dakika)			245

4.1.3 Uçucu Kül

Matris karışımlarında kullanılan uçucu kül, Soma Termik Santrali'nden temin edilmiş olup, özgül ağırlığı 2,2 ve Blaine değeri 290 m²/kg'dır. Külün kimyasal analizi Tablo 4.2'de verilmiştir. Söz konusu kül, serbest CaO oranı dışındaki kimyasal yapısı dikkate alındığında ASTM C 618 standardına göre C sınıfı olarak kabul edilebilir. Serbest CaO oranı yüksek olmasına rağmen, TS EN 450 standardına göre belirlenen genleşme açısından sorun yaratmadığı için, ilk iki aşamada üretilen matrislerde uçucu kül kullanılmıştır (Tosun, Yazıcı, Yiğiter ve Baradan, 2003).

4.1.4 Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı

Akışkanlaştırıcı katkı polikarboksilat bazlı olup, İnnovatek firması tarafından üretilmektedir. Polikarboksilat bazlı akışkanlaştırıcının fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 4.3’de sunulmuştur. Daha önceki bölümlerde ve bu bölümün tüm aşamalarında aynı akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Tablo 4.2 C sınıfı uçucu külün (Soma B) fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Bileşen	Kimyasal Analiz (%)	Bileşen	Kimyasal Analiz (%)
SiO ₂	42,14	K ₂ O	1,13
Al ₂ O ₃	19,38	Na ₂ O	-
Fe ₂ O ₃	4,64	SO ₃	2,43
C _a O	26,96	Cl ⁻	0,0010
MgO	1,78	Serbest CaO	4,34

Tablo 4.3 Polikarboksilat bazlı akışkanlaştırıcının fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Görünüşü	Kahverengi viskoz sıvı
pH	6,5
Özgül ağırlık	1,18 – 1,20
Katı madde %’si	35,7
Klor %’si	0,015

4.1.5 Standart Kum

İkinci aşamada mikro betonların yanında, ayrıca karşılaştırma amaçlı olarak harc yapımında en büyük tane boyutu 2 mm olan standart kum kullanılmıştır. Kumun özgül ağırlığı 2,65 ve su emme oranı %0,8 olarak belirlenmiştir. Standart kumun tane boyut dağılımı Tablo 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.4 Standart kumun tane boyut dağılımı (CEN standart kumu, TS EN 196).

Eleğ açıklığı (mm)	Kümülatif elekte kalan (%)
2,00	0
1,60	7±5
1,00	33±5
0,50	67±5
0,16	87±5
0,08	99±1

4.1.6 Polimer Kökenli Lifler

Deneysel çalışmaların farklı aşamalarında üç farklı tipte polimer kökenli lif incelenmiştir. Tablo 4.5’de hangi aşamada hangi liflerin kullanıldığı listelenmiştir. Mikro beton tasarımında incelenen lifler, polipropilen (PP), polivinil alkol (PVA) ve yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) kökenlidir. PP ve YYPE lifler tek bir geometride incelenmiştir. PVA lifler ise ilk aşamada 4 farklı geometride (rec7, rec15, recs100 ve rf400) incelenmiştir. Daha sonraki aşamalarda, sadece rec15 geometrisindeki lif incelendiği için bu lif “PVA” koduyla adlandırılmıştır. PP lif tüm aşamalarda incelenmiştir. YYPE lif ise tez çalışmalarının sonuna doğru temin edilebildiğinden sadece üçüncü aşamadaki çalışmalarda kullanılmıştır.

Tablo 4.5 Farklı aşamalarda incelenen lifler ve kullanım dozajları.

I. aşama	II. aşama	III. aşama
Polipropilen, %1-2	Polipropilen, %1	Polipropilen, %1
PVA (rec7), %1-2	-	-
PVA (rec15), %1-2	PVA (rec15), %1	PVA (rec15), %2
PVA (recs100), %1-2	-	-
PVA (rf400), %1-2	-	-
-	-	YYPE, %1

Polipropilen (PP) lifler Polyfibers firmasının İstanbul temsilciliğinden temin edilmiştir. Kısa kesilmiş formdaki liflerin üretici firmadan temin edilen fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 4.6’da verilmiştir. Olefin grubuna giren PP liflerin yüzeyleri pürüzsüz ve düzgün olup, hidrofob özelliktedir (Şekil 4.2).

İlk aşamada kullanılan, 4 farklı geometrik özellikteki kısa kesilmiş polivinil alkol (PVA) lifler, Japonya’dan Kuraray firmasından temin edilmiştir. Liflerin üretici firmadan temin edilen fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 4.6’da listelenmiştir. PVA lifler yüzeydeki serbest –OH bağı nedeniyle olefin liflere kıyasla daha reaktiftir. Aynı zamanda PVA liflerin yüzey pürüzlülüğü, PP liflere kıyasla daha fazladır. Şekil 4.3’de liflerin fotoğrafları verilmiştir. Ayrıca liflerin yüzey özelliklerini karşılaştırmak amacıyla, taramalı elektron mikroskobu ile 200, 1000 ve

3000 kat büyütmelelerde çekilmiş fotoğrafları Şekil 4.4’de sunulmuştur. Liflerin yüzey pürüzlülüğü, yüksek büyütmelelerde çekilen fotoğraflardan açıkça görülmektedir.

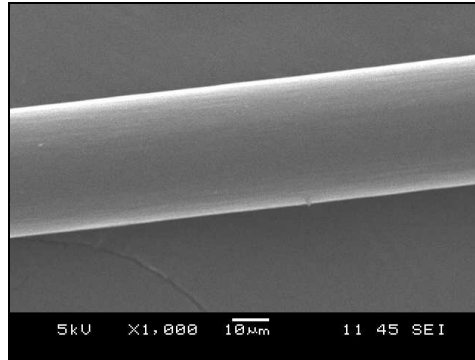
Tablo 4.6 Polimer liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri

Lif kökeni	Lif künyesi	Yoğunluk (g/cm ³)	Çap (mikron)	Boy (mm)	Boy/çap oranı (görünüm oranı)	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)	Elastisite modülü (GPa)	Kesit formu ve yüzey yapısı
Polipropilen	PP	0,95	40	10-12	250-300	400-550	>30	5,6	Dairesel, düz
Polivinil alkol (PVA)	rec7	1,3	26	6	230	1600	6	39	Dairesel, pürüzlü
	rec15		30-40*	8	200-267	1600	6	42	
	recs100		100	12	120	1200	10	29	
	rf400		200	12	60	1000	8	30	
Yüksek yoğunluklu polietilen	YYPE	0,97	18	10-12	555-667	3400	3,8	107	Dairesel, düz

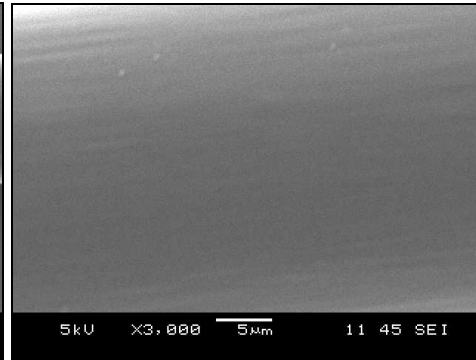
* Taramalı elektron mikroskobu incelemelerinde rec 15 lifinin çapının 30-40 mikron arasında değiştiği belirlenmiştir.



(a)

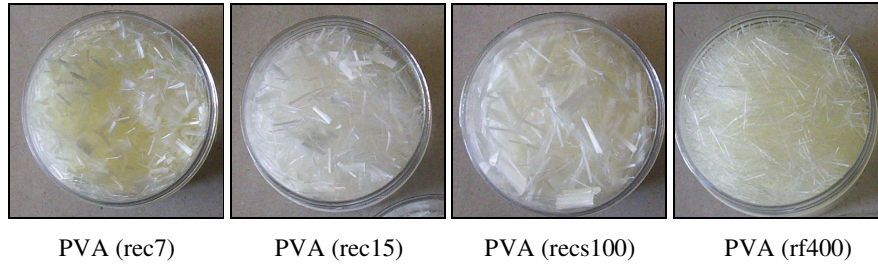


(b)

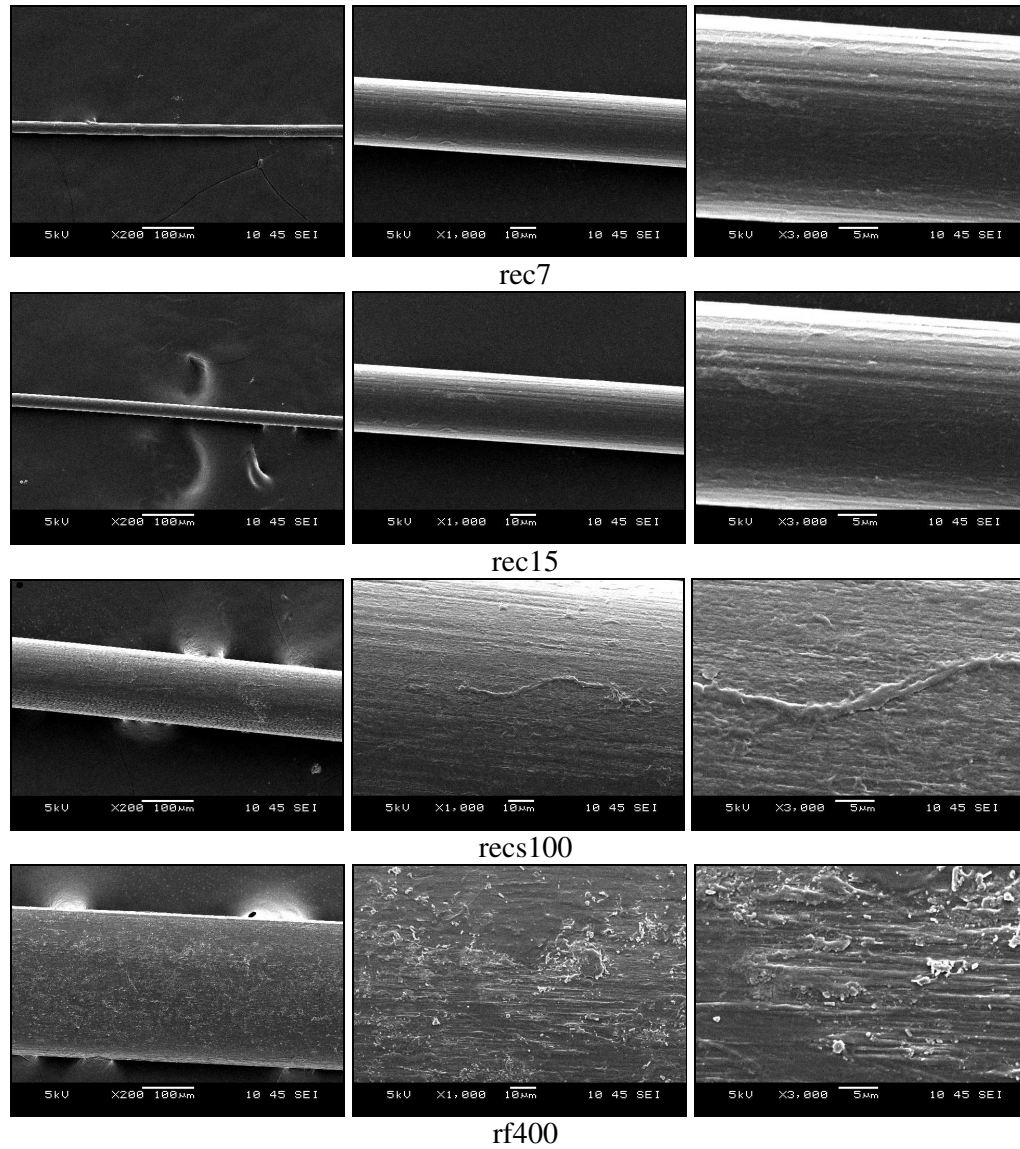


(c)

Şekil 4.2 Kısa kesilmiş polipropilen liflerin, a) görünümü, b) 1000 ve 3000 kat büyütmelelerde çekilmiş taramalı elektron mikroskobu fotoğrafları.



Şekil 4.3 PVA liflerin yığın fotoğrafları.



Şekil 4.4 PVA liflerin taramalı elektron mikroskobu ile 200, 1000 ve 3000 kat büyütmelerde çekilen mikro-fotoğrafları.

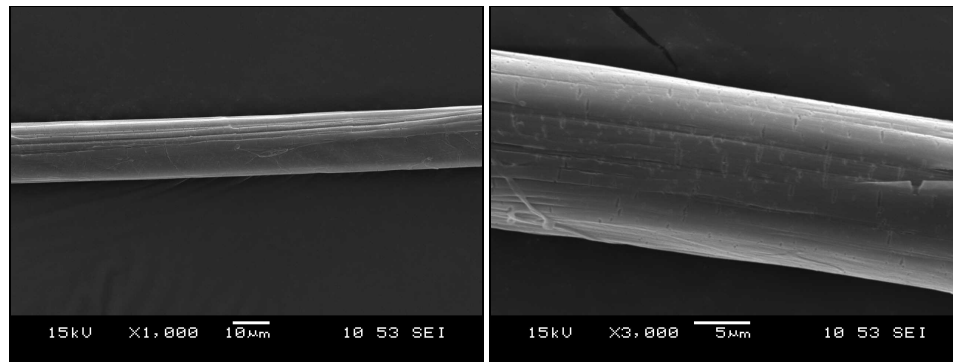
YYPE lifler de PVA lifler gibi yurtiçinde üretilmemektedir. Yurtdışı üreticileri ile yapılan görüşmelerde, YYPE'nin genellikle iplik formunda satıldığı, kısa kesilmiş liflerin artık sık üretilmediği belirlenmiştir. YYPE'nin kesiminin zor olması nedeniyle daha çok sürekli iplik formunda satıldığı öğrenilmiştir. Büyük miktarda alınması halinde sipariş üzerine kesim yapılmakta olduğu öğrenilmiştir. İplik formunda YYPE iplik temini için Gaziantep'te bu iplikleri ithal eden bir firma (PURAN Dış Ticaret) vasıtasıyla Hollanda'dan DSM firmasından Dyneema®SK75 markalı YYPE iplik getirilmiştir (Şekil 4.5). İplik çapı 2mm olup, çok sayıda 18-20 mikron çaplı ince iplikçiğin birbiri etrafına sarılmasıyla üretilmiştir. Bu iplik maket bıçağı yardımıyla yaklaşık 8-10 mm boyunda kesilerek lif haline getirilmiştir. Lifleri makasla kesmek mümkün olmamış, kesim için ondan fazla maket bıçağı köreltilmiştir. İpliğin kesmeye karşı dayanıklılığı lif haline getirilirken görülmüştür. İplikler tiftilerek liflerin birbirinden ayrılması sağlanmıştır. Yapılan denemelerde ipliği oluşturan liflerin harç karıştırılması sırasında iyice ayrılarak üniform bir şekilde harca dağıldığı görülmüştür.



Şekil 4.5 YYPE (Dyneema®SK75) ipliğin lif haline getirilmesi.

Dyneema® markalı YYPE iplikler ilk olarak 1979'da DuPont (DSM) firması tarafından özel bir yöntemle üretilmeye başlanmıştır. Yüksek molekül ağırlıklı polietilen 145°C'de çekilerek iplik haline getirilmektedir. Çekme ile zincir

formundaki polimer molekülleri %95'in üzerinde bir oranda çekme yönünde yönelmektedir. Olefin kökenli polimer liflerin üretimi sırasında yapılan mekanik ve ısıt işlemler ile amorf ve kristal yapıları değiştirilebilmektedir (Loos ve Shimanski, 2005, Androsch, 2008, Liang ve diğer., 2008). Polimerde kristal yapı oranı (kristallik derecesi) arttıkça, lifin mekanik özellikleri yükselmektedir (Liang ve diğer., 2008). YYPE liflerde kristallik derecesi %85'lere kadar çıkmaktadır. Söz konusu liflerin yönelme ve kristallik dereceleri üstün mekanik özelliklerinin başlıca nedenleridir. Dyneema®SK75 lifinin üreticisinden alınan fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 4.6'da diğer liflerle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 4.6'da tek bir Dyneema®SK75 lifinin taramalı elektron mikroskobu ile çekilen fotoğrafı verilmiştir. Diğer liflere kıyasla çok daha yüksek dayanıma ve yüksek elastisite modülüne sahip olan Dyneema®SK75 ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen sınıfına girmektedir. Dyneema®SK75'in iplik halinde balıkçı ağı, gemi halatı, kurşun geçirmez yelek gibi kullanım alanları bulunmaktadır (http://www.dsm.com/en_US/html/hpf/home_dyneema.htm).



Şekil 4.6 YYPE lifin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

4.2 Matris-Lif Kombinasyonlarının Yük-Sehim Eğrisine Etkisinin İncelenmesi (I. Aşama)

Mikro betonların matris yapısının kompozit performansına etkisinin tespiti için bazı ön denemeler yapılmıştır. Bu amaçla 4 farklı matris hazırlanmıştır. Matrislerin oluşturulmasında iki farklı mikro agrega (kireçtaşı ve silis kökenli 100 mikron altı toz malzemeler) ve C sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu kül kullanımındaki amaç, performans açısından yeterli ancak daha ekonomik bir matris karışımının

kullanılabilirliğini de incelemektir. Tablo 4.7’de matrislerin karışım oranları görülmektedir. Bu matrislerin oluşturulmasında bağlayıcı kompozisyonu yalnızca çimento içeren (MI ve MIII) ve %50 uçucu külün çimento ile ikame edildiği (MII ve MIV) seriler kullanılmıştır. MI ve MII matrislerinde mikro agrega, kireçtaşı tozu iken, MIII ve MIV matrislerinde mikro agrega, silis tozundan oluşmaktadır.

Tablo 4.7 Dört farklı matrisin karışım oranları ve teorik birim hacim ağırlıkları.

Matris kodları	Çimento	Su	Uçucu kül	Kireçtaşı tozu	Silis tozu	Süper akışkanlaştırıcı** (çimento ağırlığınca%)	Teorik BHA
	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³		kg/m ³
MI	854	380	0	854	0	%1-1,2	2088
II	378	399	378	757	0	%1,33-1,4*	1912
MIII	951	317	0	0	951	%1-1,2	2220
MIV	407	361	407	0	813	%1-1,2*	1987

* Akışkanlaştırıcı dozajı lifli kompozitlerin ayrışmadan yerleşebilmesini sağlayacak sınırlar arasında tutulmuştur. I. aşama deneylerde %1-1.33, II. aşama deneylerde %1.2-1.4.

** Dozaj çimento ve kül ağırlığının %'sidir.

Klasik çimento harcına kıyasla daha küçük boyutta malzeme içeren bu MB matrisleri, kompozit bünyesine %1-2 oranlarında lif eklenmesine olanak sağlamaktadır. Tablo 4.8’de deneylerde kullanılan lif dozajları listelenmiştir. İri taneli kompozitlerde, söz konusu lif dozajlarına çıkmak oldukça güçtür. MI, MII, MIII ve MIV matrislerinin hem lif kabul edebilir, hem de ayrışmadan yerleştirilebilir olmaları, akışkanlaştırıcı katkı dozajı ve su miktarı değiştirilerek deneme yanılma yöntemiyle sağlanmıştır. Kullanılan yöntemin ayrıntıları bir sonraki paragrafta açıklanacaktır.

Tablo 4.8 Ön denemelerde kullanılan matrisler, lif tipleri ve dozajları.

Lif kodu	Lif dozajı (%*)	Matris**
PP	1-2	MI, MII, MIII, MIV
rec7	1-2	
rec15	1-2	
recs100	1-2	
rf400	1-2	

* Toplam hacmin %'si

** Her seriden üçer örnek alınmış olup, örneklerin bir tanesi 7 günlük, diğer ikisi ise 28 günlük iken kırılmıştır.

Karışımların hazırlanmasında Hobart mikser kullanılmıştır. İlk aşamada çimento ve diğer toz malzemeler kuru olarak 30 saniye karıştırılmıştır. Ardından su ve akışkanlaştırıcı katkı ilavesi yapılarak Tablo 3.9'daki karıştırma prosedürü izlenmiştir. Hazırlanan karışımların yayılma çapları ölçülmüştür. Deneme yanılma yöntemi ile lifsiz matrislerde işlenebilirlik için en uygun yayılma çapı 300 ± 20 mm olarak bulunmuştur ve her matriste yayılma çapı bu değerde olacak şekilde, su ve katkı miktarı ayarlanmıştır. Lifsiz matrislerin karışım oranları bu şekilde belirlenmiştir. Son olarak karışıma lif ilavesi yapılmıştır. Şekil 4.7'de MI matrisi ile yapılan deneylerde görüldüğü gibi, lif ilavesi matris hazırlandıktan sonra doğrudan karışım kabına dökme şeklinde yapılmıştır. Akıcı kıvamdaki karışıma, lifler %1 ve %2 oranında ilave edilmiştir. Karışımın lif ilavesinden sonraki yayılma çapı her lif tipi için farklılık göstermektedir. Şekil 4.8'de MI matrisi için %2 lif ilavesinin yayılma çapını nasıl değiştirdiği görülmektedir. Lifli matrislerin yayılma çapını, su veya akışkanlaştırıcı ilavesi ile lifsiz matrise eşitlemeye çalışmak, matrisin viskozitesini aşırı düşürmekte ve ayrışma meydana gelmektedir. Bu nedenle lifli karışımların yayılma çapları farklılık göstermektedir.



Şekil 4.7 Liflerin matrise ilavesi (a: %2 PP, b: %2 PVA (rec7)).

Yüksek lif oranlı karışımlarda eğer lif küçük çaplı ve kısa (PP, rec7, rec15) ise lifli matris kalıba az miktarda sıkıştırma uygulanarak yerleştirilmiştir. Lif göreceli olarak uzun ve kalın ise (recs100, rf400), yüksek dozajda bile matris kalıba kendiliğinden yerleşebilir kıvamda olduğu için sıkıştırmaya gerek kalmamaktadır (Şekil 4.9). Ayrıca, yüksek lif oranlı karışımlarda eğer lif küçük çaplı ve kısa (PP, rec7, res15) ise, kalıp yüzeyinin perdahlanması zorlaşmaktadır. Perdah sonrasında yüzeyde dalgalanmalar meydana gelmektedir (Şekil 4.10). Bu sorun reoloji

incelemelerinde de özellikle polipropilen ve yüksek yoğunluklu polietilen lifler için belirgin olmuştur. Boyu daha kısa olan küçük çaplı PVA lifler ise (rec7 ve rec15) göreceli olarak perdahlanabilirliği daha az etkilemektedir. PVA liflerin yoğunluğunun $1,3 \text{ g/cm}^3$ olması, sabit hacim için gerekli lif ağırlığını azaltmaktadır. Böylece mikro betonun işlenebilirliğine etkileri diğer liflerden daha az olmaktadır.

		
Kontrol (>250 mm, yerde 300 mm)	PVA (rf400 %2) (240 mm)	PVA (recs100 %2) (188 mm)
		
PVA (rec 7 %2) (154 mm)	PVA (rec 15 %2) (128 mm)	PP %2 (165 mm)

Şekil 4.8 MI matrisine %2 lif ilavesinin karışımların yayılma çapına etkisi.

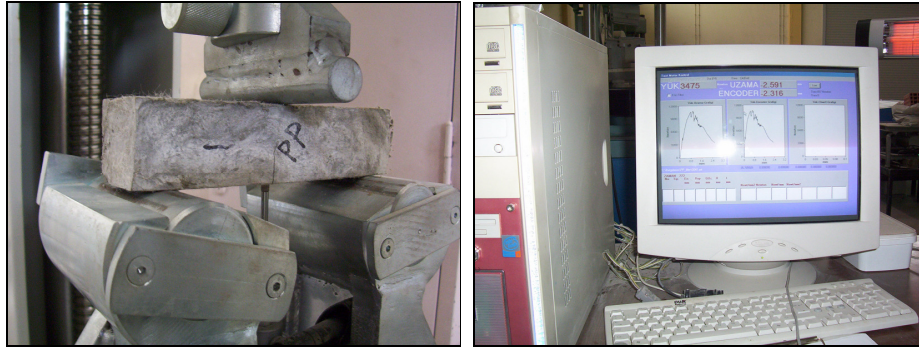


Şekil 4.9 Kendiliğinden yerleşen kıvamdaki matrisin kalıba yerleşimi (PVA rf400).



Şekil 4.10 PP lifin yüksek oranda kullanılması (%2) halinde perdah yüzeyi.

Hazırlanan örnekler 1 gün sonra kalıptan alınıp, 20°C’de suda bekletilmiştir. Her seriden üçer örnek alınmış olup, örneklerin bir tanesi 7 günlük, diğer ikisi ise 28 günlük eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Örneklerin yük-sehim grafikleri deformasyon kontrollü bir eğilme presi kullanılarak elde edilmiştir. Örnekler 130 mm’lik açıklıkta ortadan tekil olarak yüklenmiştir. Orta nokta sehim yüklemeyle birlikte kaydedilmiştir (Şekil 4.11). İki ton kapasiteli yük hücresi kullanılarak, lifli örneklerde 0,2 mm/dak, lifsiz örneklerde ise 0,02 mm/dak hızla yükleme yapılmıştır.



Şekil 4.11 Eğilme deneyi yükleme düzeneği ve yük-sehim eğrisinin elde edilmesi.

4.2.1 Yük-Sehim Eğrilerinin Değerlendirilmesi ve Tartışma

Dört farklı matris kullanılarak hazırlanan örneklerden elde edilen yük-sehim eğrileri Şekil 4.12-4.15’de her lif türü ve dozajı için ayrı ayrı verilmiştir. Yük-sehim eğrileri üzerinden okunan en yüksek eğilme yükleri ile her karışımın 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları hesaplanmıştır. Eğilme dayanımı değerleri sütun grafikler halinde Şekil 4.16’da sunulmuştur. Ayrıca, yükleme açıklığının 1/100’ü olan 1,3 mm sehime kadar yük-sehim grafikleri altında kalan alanlar hesaplanarak örneklerin eğilme toklukları belirlenmiştir. Yükleme 1,3 mm sehime ulaşamayan örneklerde, yükün ölçüldüğü son sehim değerine kadar olan alan kullanılmıştır. Tokluk değerleri de Şekil 4.17’de verilmiştir. Eğilme deneyi sırasında, bazı örnekler yüklenirken açıklık ortasındaki bölgede birden çok çatlağın oluştuğu tespit edilmiştir. Çoklu çatlak davranışının gözlemlendiği mikro betonların tokluk değerleri sütun grafikleri üzerine “yıldız” simgesi ile işaretlenmiştir.

Yük-sehim eğrileri üzerinde yapılan incelemelerde, her matris-lif kombinasyonunun kendine özgü bir yapısı olduğu ve çok farklı eğrilerin ortaya çıkabileceği belirlenmiştir. Grafikler yardımıyla aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

- Lifsiz matrisler kullanılarak hazırlanan mikro betonlar çok düşük sehim değerlerinde en yüksek eğilme yüküne ulaşmakta ve ilk çatlama sonrası yük taşıma kapasitelerini kaybetmektedir (Şekil 4.12-4.15a). Lifsiz mikro betonların eğilme dayanımı değerleri, bazı lifli mikro betonlarla benzer seviyelerde olmasına rağmen, tokluk değerleri tüm lifli serilere kıyasla, aşırı derecede düşüktür (Şekil 4.16 ve 4.17). Buradan lif kullanımının mikro betonun gevrek yapısını azaltmak için bir zorunluluk olduğu ortaya çıkmaktadır.

- Liflerin genel performansları incelendiğinde, lif dozajı artışının hem kompozitin eğilme dayanımını, hem de tokluk performansını önemli derecede arttırdığı görülmüştür.

- PP lifler ile bu liflere benzer geometrideki PVA lifler (rec7, rec15) karşılaştırıldığında, birbirinden oldukça farklı yük-sehim eğrilerinin elde edildiği görülmektedir. PP lifli kompozitlerde çoğunlukla ilk çatlaktan sonra ani yük düşüşü gözlenmektedir (Şekil 4.12-4.15b). Matris türüne göre ani yük düşüşü miktarı değişkenlik gösterebilmektedir. Bu düşüş anında açığa çıkan çatlaktaki lifler, sehim artışı ile birlikte matristen sıyrılarak yük taşımaya devam etmektedir. Lif dozajına göre çatlağın açıldığı kesitte lif sayısı çoksa, açılan çatlaktaki lifler ilk çatlak yükünden daha yüksek yükler taşıyabilmekte, hatta bu kompozitlerde erken yaşlarda çoklu çatlak davranışı gözlenebilmektedir (Şekil 4.12-4.15c). Örneğin, %2PP lif katkılı MI ve MIII matrisleri ile hazırlanan örneklerin, 28 günlük eğilme deneyi çatlak fotoğrafları Şekil 4.18'de verilmiştir. Kompozitlerde %2 PP lif kullanımı ile 2-3 çatlak oluştuğu görülmektedir.

- Uzun ve kalın çaplı PVA liflerin (recs100, rf400) kullanıldığı kompozitlerin yük-sehim davranışı ile kısa ve küçük çaplı liflerinkinin (rec7, rec15) farklı oldukları belirlenmiştir. Bu nedenle PVA liflerin katıldığı kompozitlerin davranışını iki ayrı

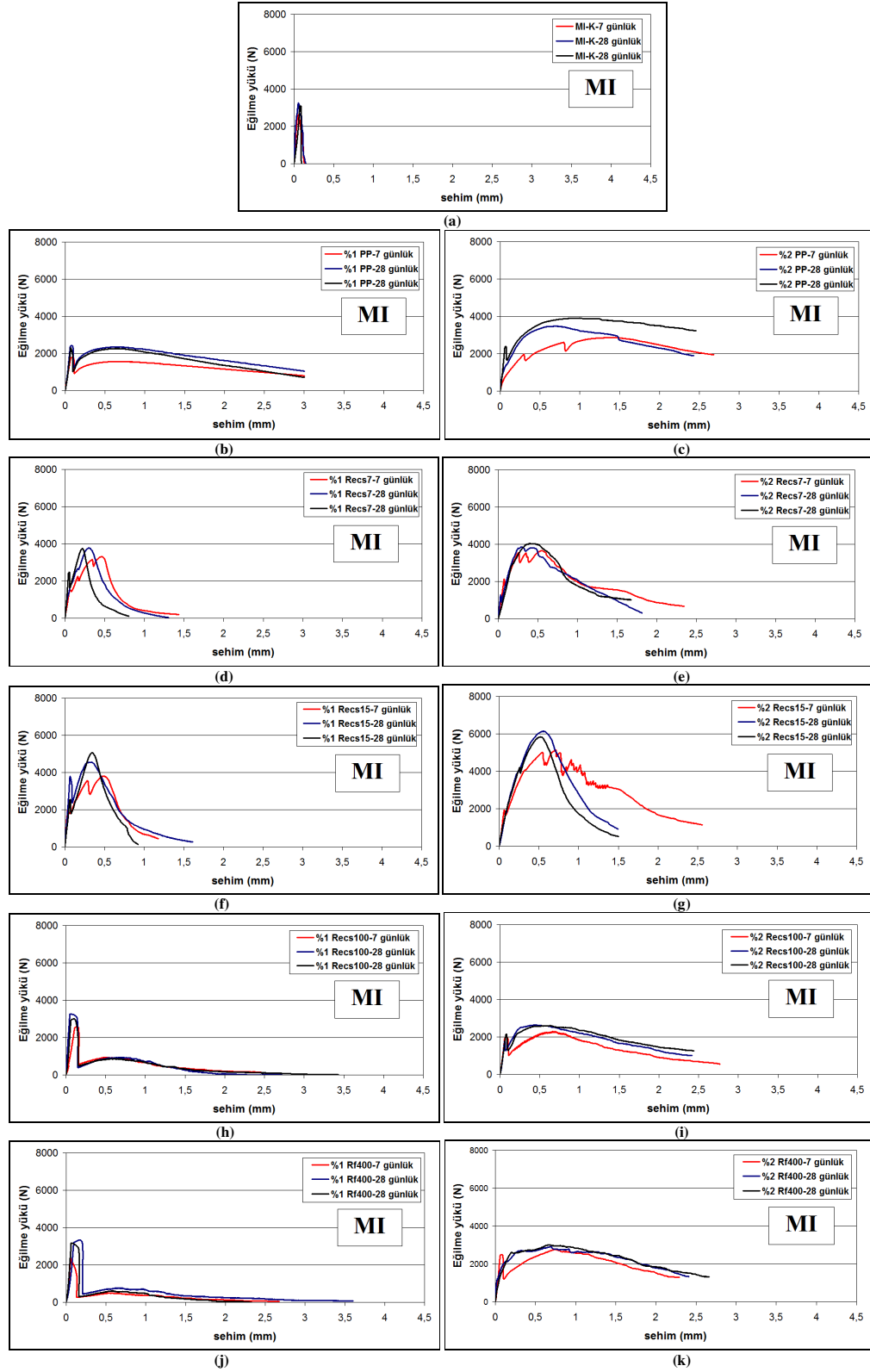
grupta incelemek gerekir. Kısa ve küçük çaplı liflerin kullanıldığı kompozitlerde, %1 kullanım oranında ilk çatlak oluşumundan sonraki yük düşüşü, PP lifli kompozitlere kıyasla daha düşüktür (Şekil 4.12-4.15d, 4.12-4.15f) . Bunun nedeni güçlü lif-matris aderansına ve liflerin yüksek çekme dayanımına bağlanmıştır. Lif dozajı da burada önem kazanmaktadır. Lif miktarının azlığı, çoklu çatlak ihtimalini azaltmaktadır. Buna rağmen uçucu küllü MII matrisinin kullanıldığı serilerde, 28 günlük örneklerde çoklu çatlak davranışı rec15 lifinin %1 dozajı için bazı örneklerde gözlenmiştir (Şekil 4.19). Lif dozajının artırılması halinde, ilk çatlaktan sonra yük düşüşü daha da azalmakta veya hemen sonra yük artışı devam etmektedir. Çatlaktaki lif sayısının çokluğu, liflerin köprülenme ile matrise aktardığı yükü arttırmakta ve ikinci, üçüncü çatlakların açılmasını sağlamaktadır (Şekil 4.12-4.15e, 4.12-4.15g). Böylece çoklu çatlak davranışı gözlenme olasılığı artmaktadır. Şekil 4.20'de rec15 lifinin %2 oranında kullanılması halinde MII matrisi kullanılan kompozitte meydana gelen çatlaklar görülmektedir.

Uzun ve kalın çaplı PVA liflerin (recs100, rf400) kullanıldığı kompozitler incelendiğinde, düşük dozajların, kompozit performansını olumsuz etkilediği belirlenmiştir (Şekil 4.12-4.15h, 4.12-4.15j). İlk çatlak açılmasından sonra kesitteki liflerin sayısının az olması, liflerin fazla sıyrılmadan kopmasına neden olmaktadır. Bu yüzden, PVA lifli kompozitlerin performansı, aynı dozajda PP lifli kompozitlerden bile daha kötüdür. Lif dozajının artırılması performansı olumlu etkilemiş ve bazı matrislerde çoklu çatlak davranışı gözlenmesini sağlamıştır (Şekil 4.12-4.15i, 4.12-4.15k). Örneğin %2 recs100 lifi içeren MIII matrisli mikro beton kompozitte gözlenen çoklu çatlak davranışı Şekil 4.21'de verilmiştir.

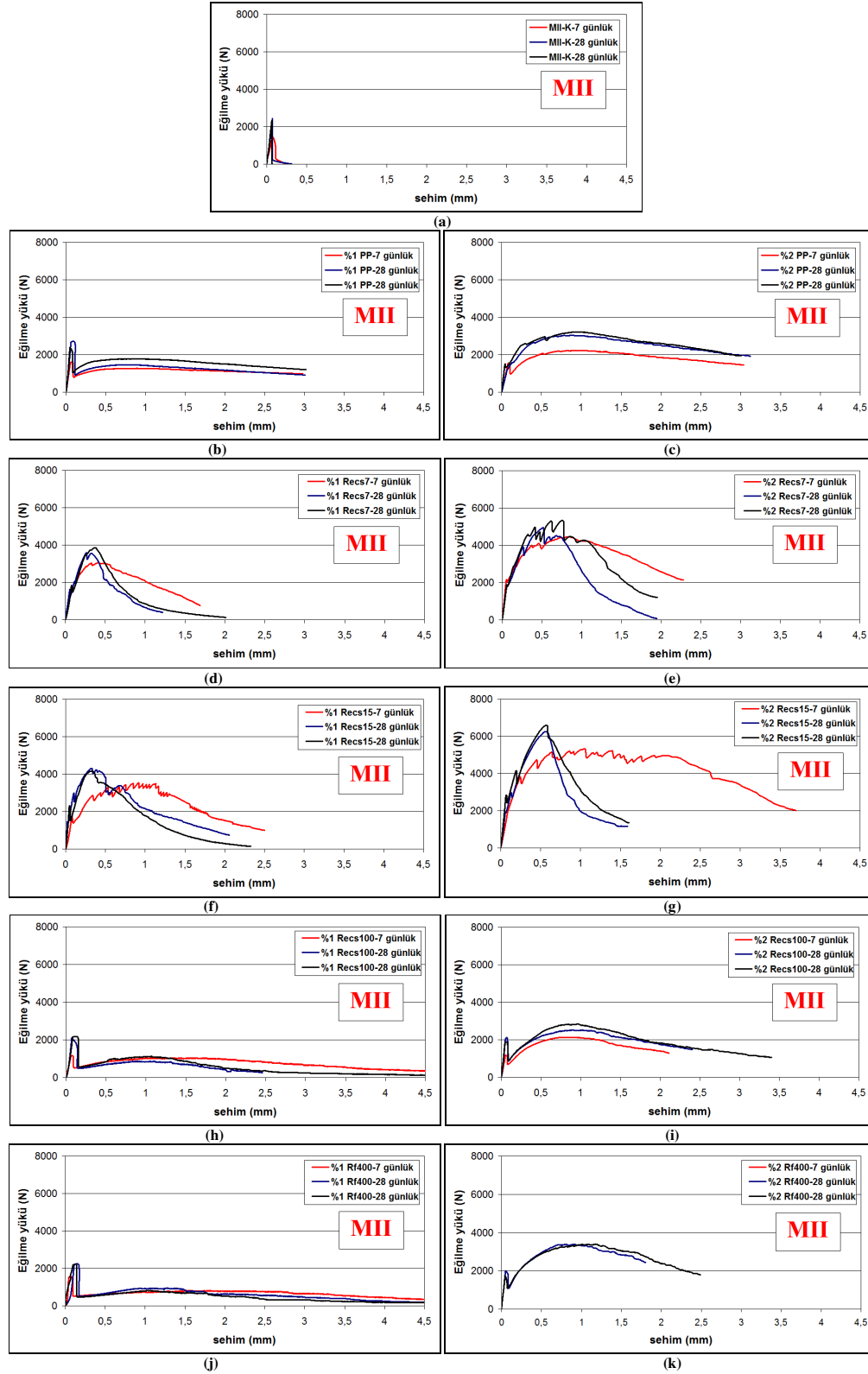
Genel olarak incelenen koşullar altında kısa ve küçük çaplı liflerde (rec7, rec15) çoklu çatlak potansiyeli, uzun ve kalın çaplı PVA liflerden (recs100, rf400) daha fazladır. Şekil 4.17'de yıldız ile işaretlenen örneklerin çoğunlukla, rec7 ve rec15 liflerini içerenler olması bu durumun göstergesidir. Uzun ve kalın çaplı PVA liflerin (recs100, rf400) kullanıldığı kompozitlerde (MIII matrisinde %2 recs100 lifi kullanımı hariç) çoğunlukla çoklu çatlak elde edilememiştir.

Çimento bazlı kompozitlerin zamanla dayanım kazanması ve rijitleşmesi örnek yaşını önemli hale getirmektedir. Kompozit yaşının bazı örneklerde yük-sehim eğrisini önemli derecede etkilediği belirlenmiştir (Şekil 4.12-4.15). Yedi günlük örneklerde eğilme dayanımı daha düşük olmasına rağmen, kompozit tokluğunun 28 günlük örneklerle kıyasla daha yüksek değerler aldığı gözlenmiştir. Bu durum MI ve MII matrisleri ile hazırlanan ve kısa PVA lifi (rec7, rec15) içeren serilerde daha fazla gözlenmektedir. Erken yaşlarda lifin matrisle aderansının fazla olmaması nedeniyle, PVA lifler sıyrılarak yük taşımakta, böylece daha yüksek sehim değerlerine ulaşılmasını sağlamaktadır. Bu aşamada lifler, aynı zamanda çatlak köprülenmesi yükünü belli seviyede tutabilirse, yeni çatlakların oluşmasını sağlamaktadır. Erken yaşlarda henüz yeterli rijitliğe ulaşmamış matrisin, farklı kesitlerden çatlaması olasılığı da yüksektir. Nispeten sünek davranış gösteren bu örneklerde çoklu çatlak davranışı yoğun olarak gözlenmektedir. Kompozit yaşlandıkça, lif-matris aderansı arttığı için, PVA lifler en yüksek eğilme yükünden sonra kopup göçmektedir. Örnekler göreceli olarak daha gevrek davranmaktadır. PVA liflerin yeni çatlak açacak kadar yük köprüleyebilmeleri (matrise aktarabilme) halinde ise, çoklu çatlak potansiyeli bir miktar daha sürdürülebilmektedir.

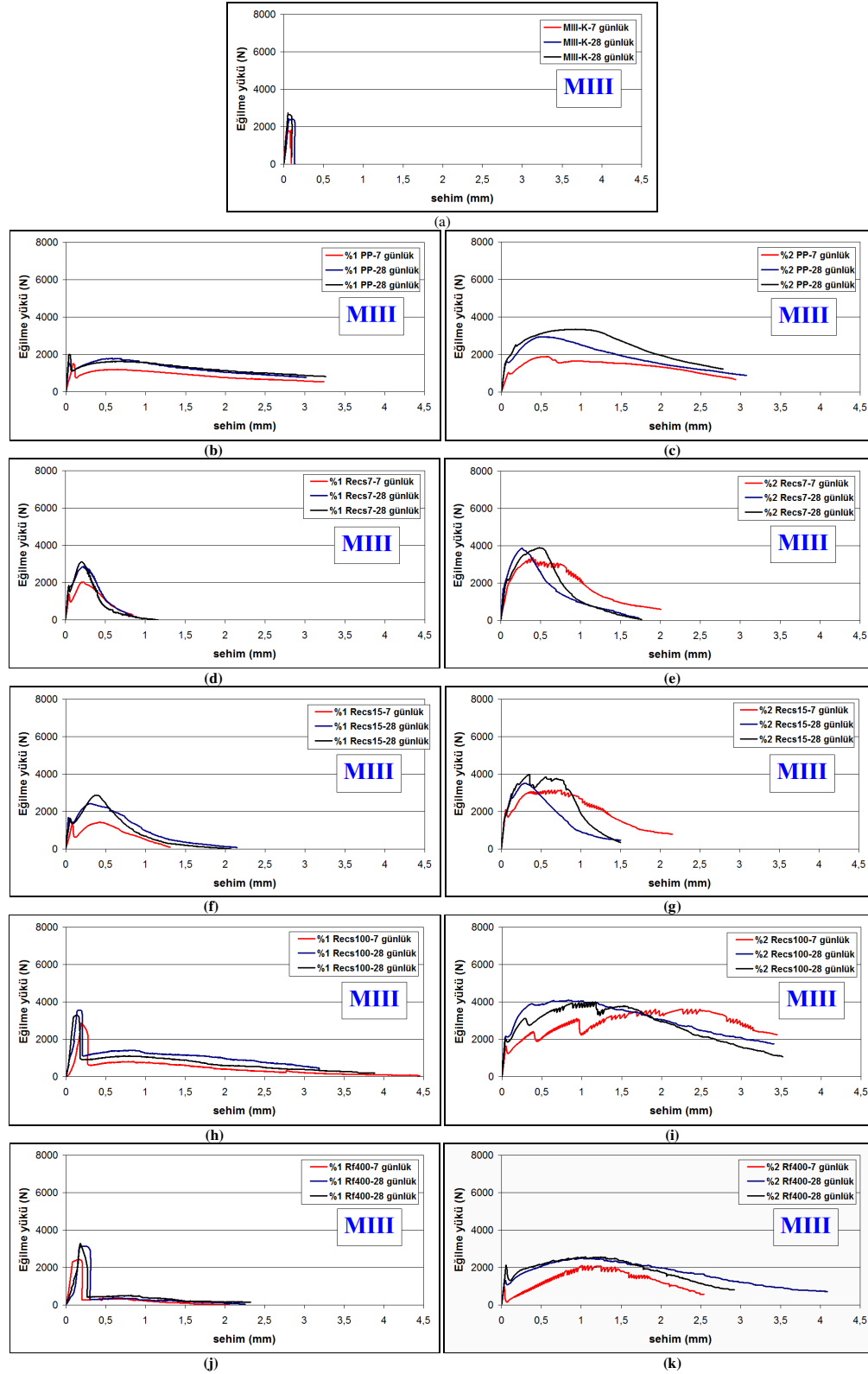
Tüm örneklerin en büyük çatlağın açıldığı yüzeyleri deneyden sonra ikiye ayrılarak incelendiğinde, küçük çaplı ve kısa liflerin özellikle yüksek dozajda kullanıldığında bazı matrislerde kümелendiği tespit edilmiştir. Bu lifler PP, rec7 ve rec15 lifleri olup, ana çatlağın açıldığı kesit fotoğrafları Şekil 4.22-4.25’de verilmiştir. Yapılan gözlemlerden, liflerin karışımında en homojen dağılmasını sağlayan matrisin, *MI matrisi* olduğu belirlenmiştir. Kireçtaşı tozuna kıyasla daha iri taneli olan silis tozunun mikro agrega olarak kullanıldığı MIII ve MIV matrislerinde sözü edilen lif topaklaşması olayı daha çok gözlenmiştir. Bu örneklerin mekanik performansları da çoğunlukla, aynı lifin kullanıldığı kireçtaşı tozu mikro agregalı serilerden belirgin şekilde daha kötüdür. Ayrıca uçucu küllü karışımların daha kohezif yapısı da bazı durumlarda liflerin dağılımını zorlaştırabilmektedir. Ancak uçucu külün kullanıldığı MII matrisinde lif dağılımı açısından bir sorunla karşılaşılmamıştır. Bu yüzden uçucu kül kullanımı ile ilgili genelleme yapmak doğru değildir.



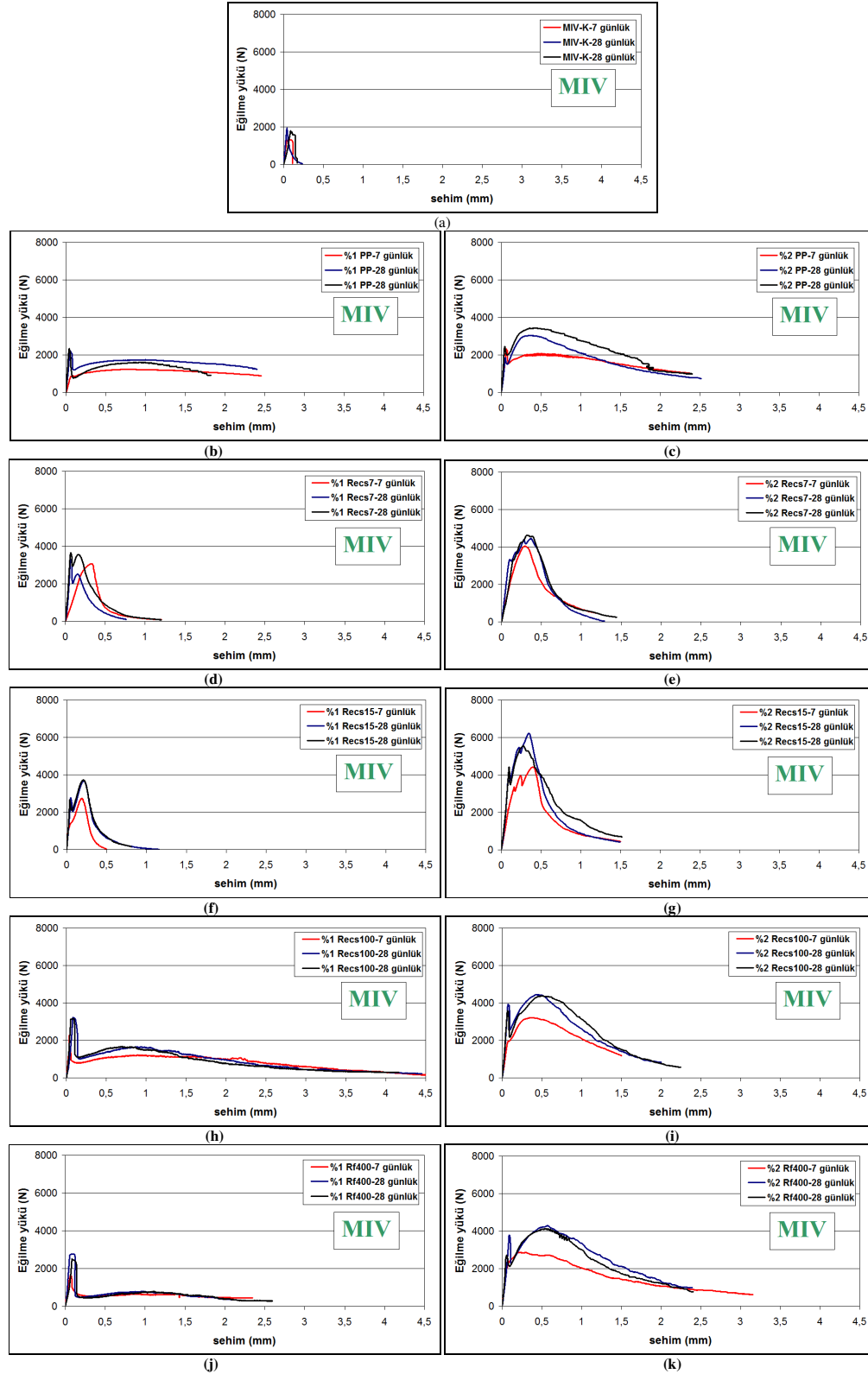
Şekil 4.12 MI (%50Ç-%50TT) matrisinde farklı liflerin yük-sehim eğrisine etkileri; a) Lifsiz matris, b,c) %1-2 PP, d,e) %1-2 rec7, f,g) %1-2 rec15, h, i) %1-2 recs100, j, k) %1-2 rf400.



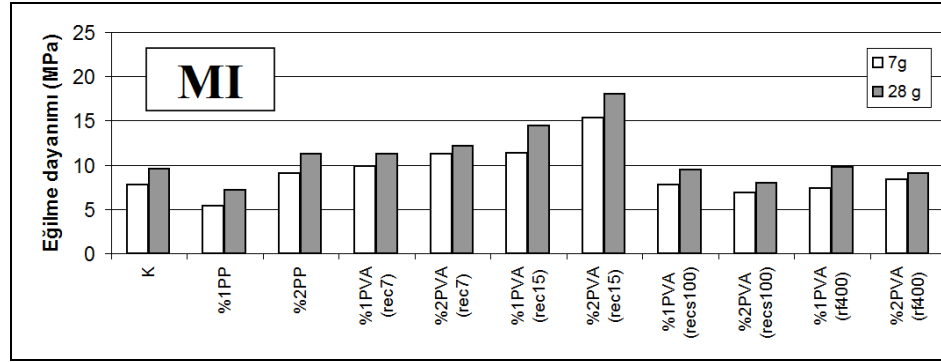
Şekil 4.13 MII (%25Ç-%25UK-%50TT) matrisinde farklı liflerin yük-sehim eğrisine etkileri; a) Lifsiz matris, b,c) %1-2 PP, d,e) %1-2 rec7, f,g) %1-2 rec15, h, i) %1-2 recs100, j, k) %1-2 rf400.



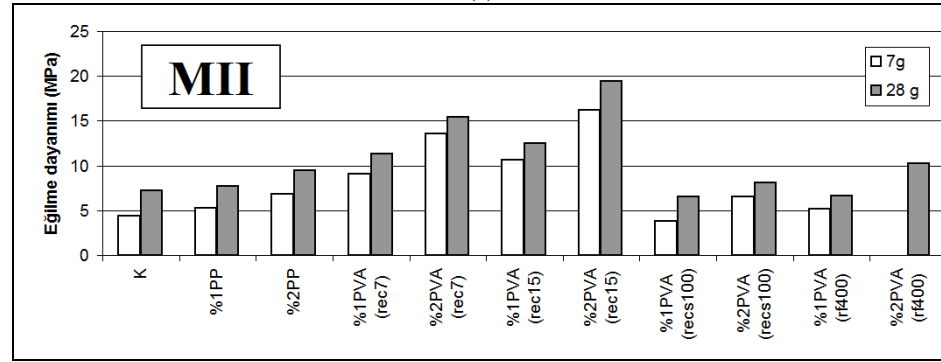
Şekil 4.14 MIII (%50Ç-%50ST) matrisinde farklı liflerin yük-sehim eğrisine etkileri; a) Lifsiz matris, b,c) %1-2 PP, d,e) %1-2 rec7, f,g) %1-2 rec15, h, i) %1-2 recs100, j, k) %1-2 rf400.



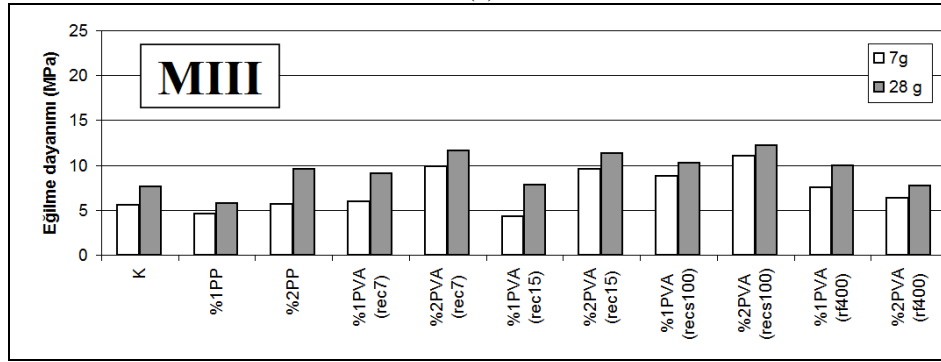
Şekil 4.15 MIV (%25Ç-%25UK-%50ST) matrisinde farklı liflerin yük-sehim eğrisine etkileri;
a) Lifsiz matris, b,c) %1-2 PP, d,e) %1-2 rec7, f,g) %1-2 rec15, h, i) %1-2 recs100, j, k) %1-2 rf400.



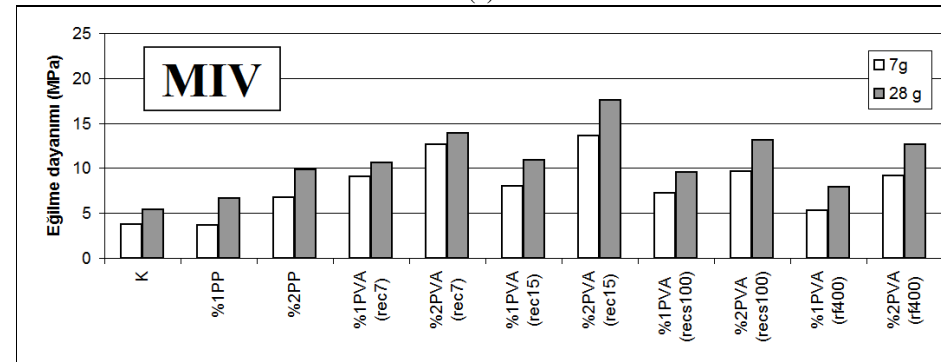
(a)



(b)

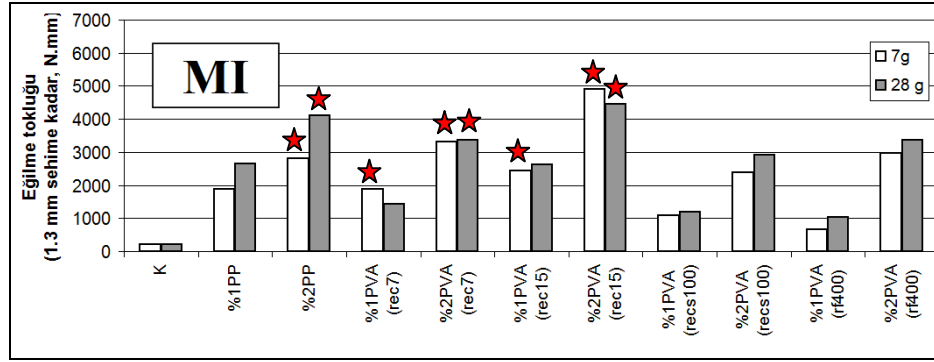


(c)

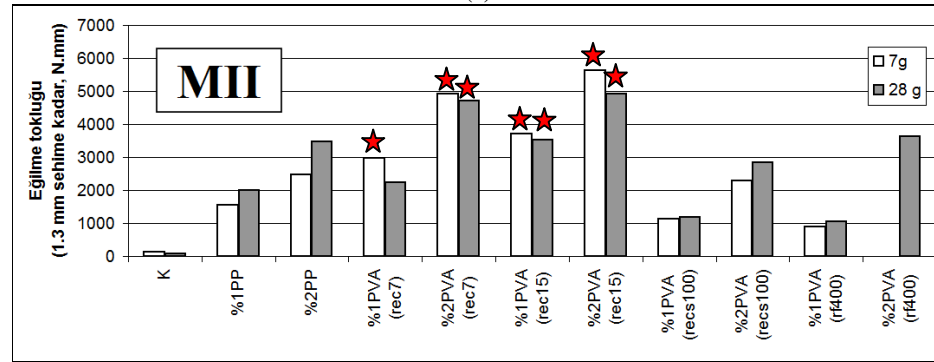


(d)

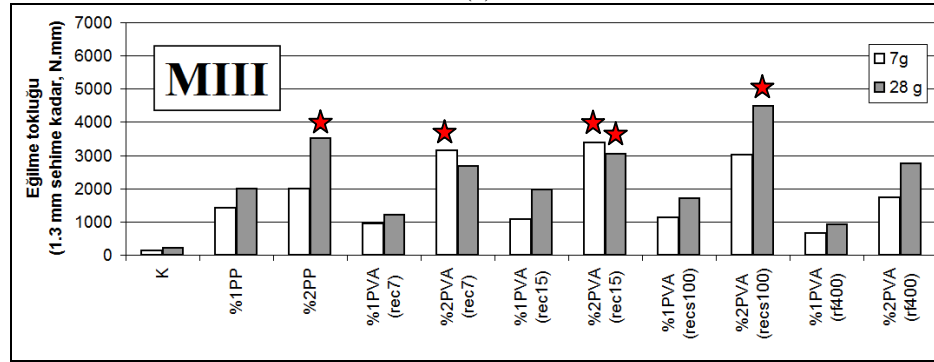
Şekil 4.16 Mikro betonların matris-lif kombinasyonlarına bağlı olarak eğilme dayanımlarının değişimi.



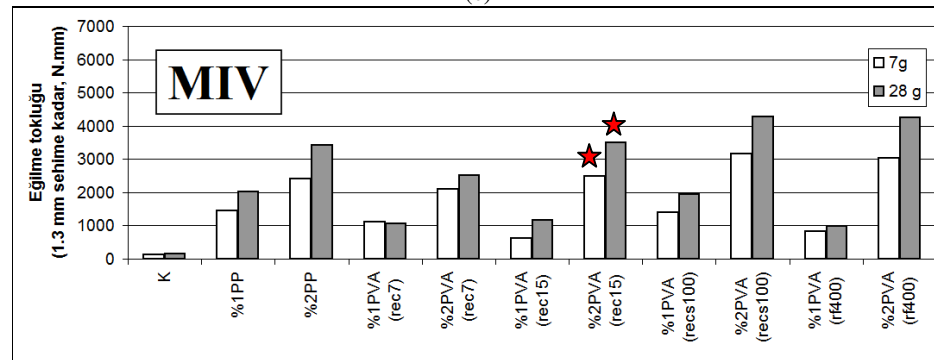
(a)



(b)

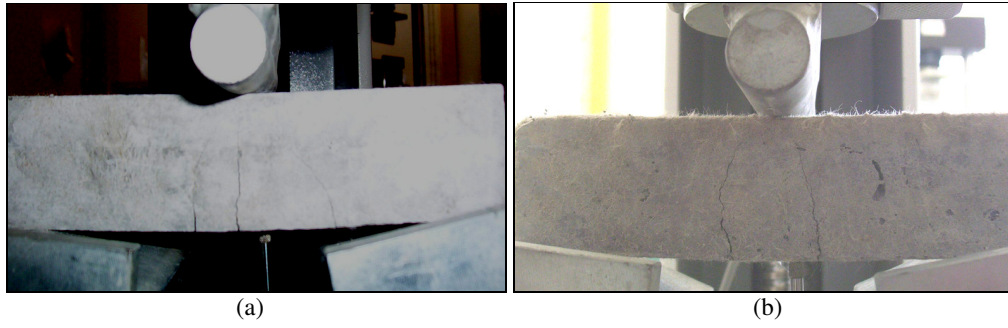


(c)



(d)

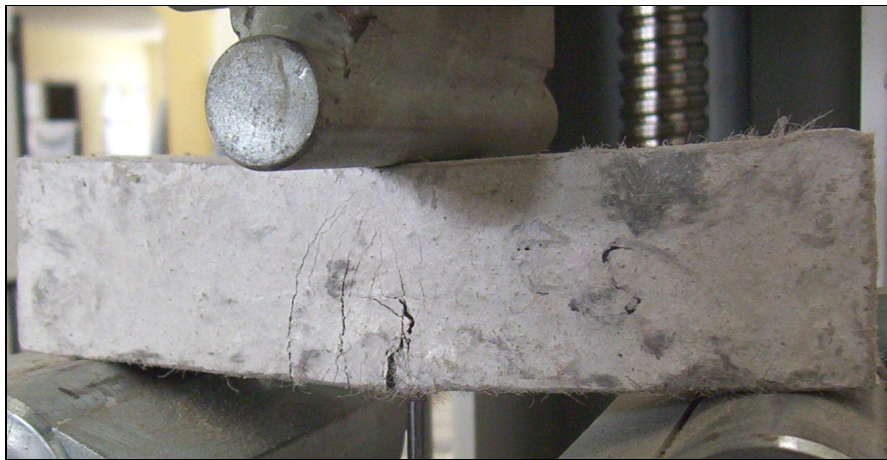
Şekil 4.17 Mikro betonların matris-lif kombinasyonlarına bağlı olarak eğilme tokluklarının değişimi (Yıldız işareti çoklu çatlak gözlenen örnekleri belirtmektedir).



Şekil 4.18 PP lif dozajı %2 olan 28 günlük kompozitlerde gözlenen çoklu çatlak davranışı; a) MI, b) MIII.



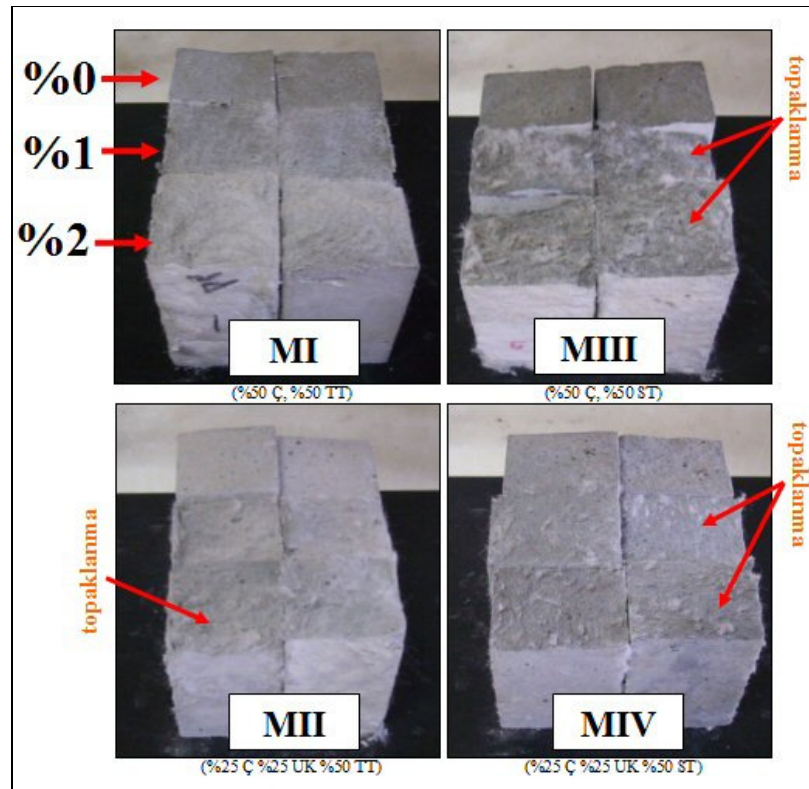
Şekil 4.19 MII matrisinde rec15 lifinin %1 oranında kullanıldığı örnek.



Şekil 4.20 Rec15 lifinin %2 oranında kullanılması halinde, MII matrisli kompozitte meydana gelen çatlaklar.



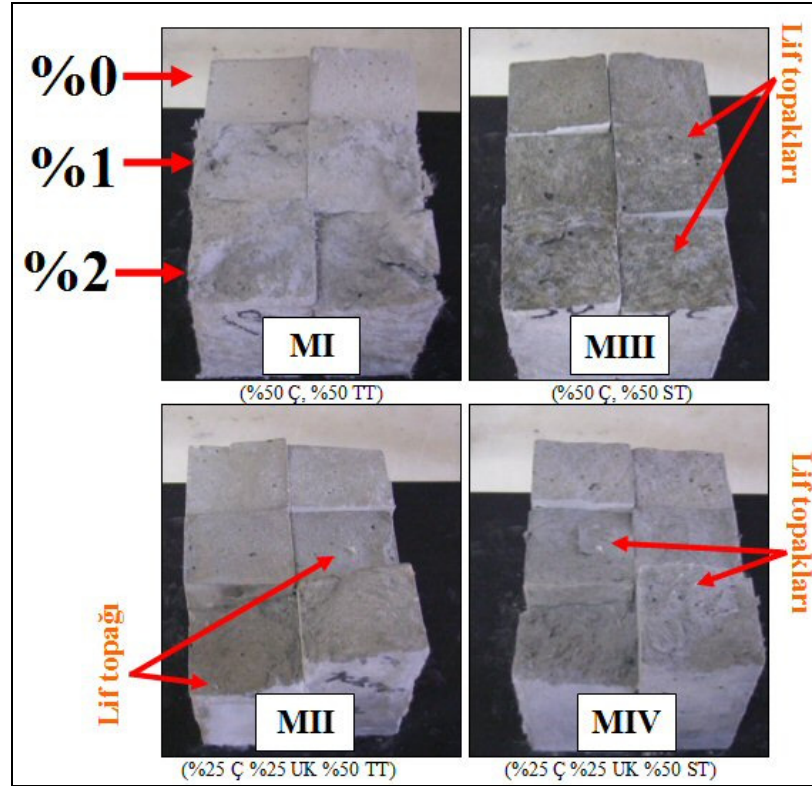
Şekil 4.21 %2 recs100 lifi içeren MIII matrisinin çatlak fotoğrafı.



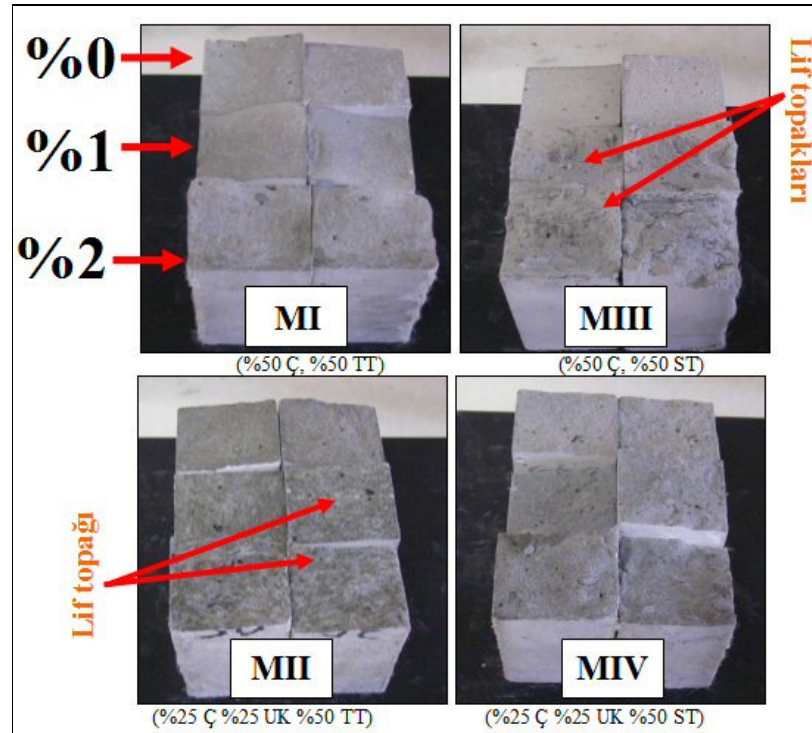
Şekil 4.22 PP liflerin farklı matrislerde farklı kullanım oranlarında eğilme deneyi sonrası ana çatlak yüzeyi görünüşleri.



Şekil 4.23 PP liflerin MI matrisinde homojen lif dağılımı (%2).



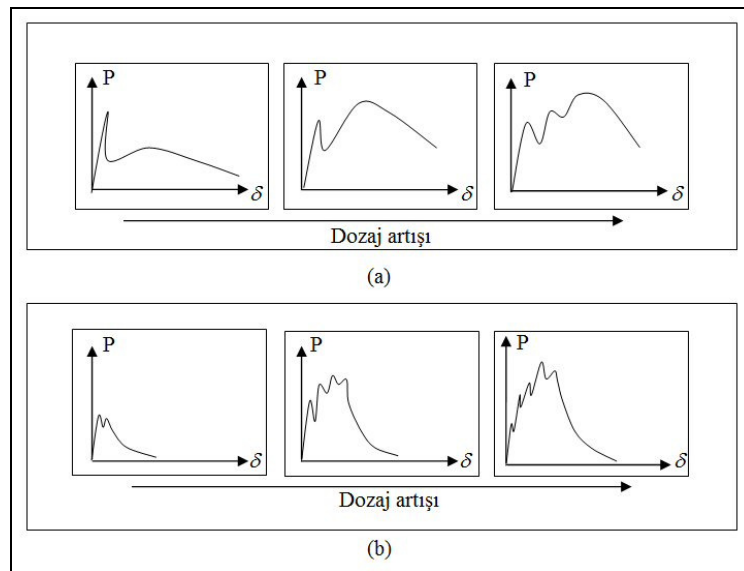
Şekil 4.24 PVA (rec7) liflerin farklı matrislerde farklı kullanım oranlarında eğilme deneyi sonrası ana çatlak yüzeyi görünüşleri.



Şekil 4.25 PVA (rec15) liflerin farklı matrislerde farklı kullanım oranlarında eğilme deneyi sonrası ana çatlak yüzeyi görünüşleri.

4.2.2 Birinci Aşama Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçlar

Liflerin türü, geometrik şekli ve dozajına göre, farklı matrislerde mikro beton kompozitlerin yük-sehim grafikleri değişkenlik göstermektedir. Eğilme dayanımını hiç etkilemeyen veya arttıran lif-matris kombinasyonları elde edilmiştir. *Ancak lif ilavesi ile tür ve şekilden bağımsız olarak tüm kompozitlerin eğilme yüklemesi altında belirlenen tokluk değerleri artış göstermektedir.* Lif dozajı artışı, tokluk ve dayanım artışını perçinlemektedir. Lif türüne ve geometrisine göre dozaj artışının yük-sehim grafiğine pozitif etkisi değişkenlik göstermektedir. Şekil 4.26a'da PP lifler için dozaj artışı ile elde edilen grafikler şematize edilmiştir. Şekil 4.26b'de ise kısa ve ince çaplı PVA liflerin (rec7, rec15) dozaj artışı ile performansı görülmektedir. İkinci serideki lifler en yüksek eğilme yükünden sonra kopmaya eğilimli olduğu için, kuyruk kısımlarında yük daha hızlı düşmektedir. PP lifler ise sıyrılarak yük taşımaya devam etmekte, kuyruk kısmında yük daha yavaş düşmektedir.



Şekil 4.26 Lif dozajı artışı ile yük-sehim eğrilerindeki değişim;
a) PP lifler, b) İnce çaplı, kısa PVA lifler (rec7, rec15).

Liflerin matriste homojen dağılımı dikkate alındığında, mikro beton matrisinde kullanılan *mikro agrega boyutunun* kritik olduğu sonucu elde edilmiştir. Eğilme deneyi sonrası kırılma yüzeyleri incelendiğinde, tane boyutu silis tozuna kıyasla daha

küçük olan kireçtaşı tozunun, liflerin matrise homojen yayılmasında daha avantajlı olduğu görülmüştür. Mikro agreganın tane boyutunu küçültmek lif topaklaşması riskini azaltmaktadır.

PVA lifler çoklu çatlak oluşturma potansiyeli açısından özellikle erken yaşlarda daha avantajlıdır. Örnekler yaşlandıkça, çoğunlukla çoklu çatlak potansiyeli azalmaktadır. Hem yüksek dayanım hem de matrisle aderansı, lif köprülenmesini sağlayarak matriste yeni çatlakların oluşmasını sağlamaktadır. Ancak aderansın yüksek olması ve düşük lif dozajı durumunda, lifler çatlağın açıldığı kesitte, üzerlerine gelen yüksek gerilmeye karşı koparak göçmektedirler. Bu durumda kompozitin tokluk değeri sınırlı kalmaktadır.

4.3 Matris – Lif Kombinasyonlarının Yük-Sehim Eğrisine Etkisinin Farklı Örnek Şekillerinde Karşılaştırılması (Mini Plaka Deneyleri)

Bir önceki bölümde farklı matris – lif kombinasyonlarının 40*40*160 mm ayrıtlı prizmatik örneklerin ortadan tekil yükleme deneyi sırasında elde edilen yük-sehim grafiklerine etkileri incelenmiştir. Bu incelemelerden kısa ve küçük çaplı PVA liflerin çoklu çatlak potansiyeli açısından, PP liflerden daha avantajlı olduğu belirlenmiştir. Ancak mikro betonun uygulamada, daha ince kalınlıklı plakaya benzer formda kullanımı da söz konusudur. Mikro beton kompozitlerin daha ince kalınlıklı olarak nasıl bir performans vereceğinin incelenmesi amacıyla, tez kapsamında geliştirilen farklı bir örnek hazırlama yöntemiyle mini-plaka formunda örnekler üretilmiştir. Bu amaçla, prizmatik örnek incelemelerinde, farklı yük-sehim eğrileri elde edilen üç karışım (MI-%2PP, MII-%2rec7 ve MII-%12rec15) seçilmiştir. Mini plaka örnekler ortadan tekil yükleme ve çift nokta yükleme gibi iki farklı koşulda yüklenerek eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, aynı karışımların 40*40*160 mm ayrıtlı prizmatik örneklerdeki performansları ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma ile kompozit şeklinin ve yükleme koşulunun yük-sehim eğrisini ve çoklu çatlak potansiyelini nasıl etkilediğinin ortaya konulması hedeflenmiştir. Ayrıca plaka örnekler için farklı bir örnek hazırlama yöntemi ilk defa

kullanılmıştır. Söz konusu yöntem ile yüksek lif dozajlarına sahip karışımlardan homojen örnek hazırlamak mümkün olmaktadır.

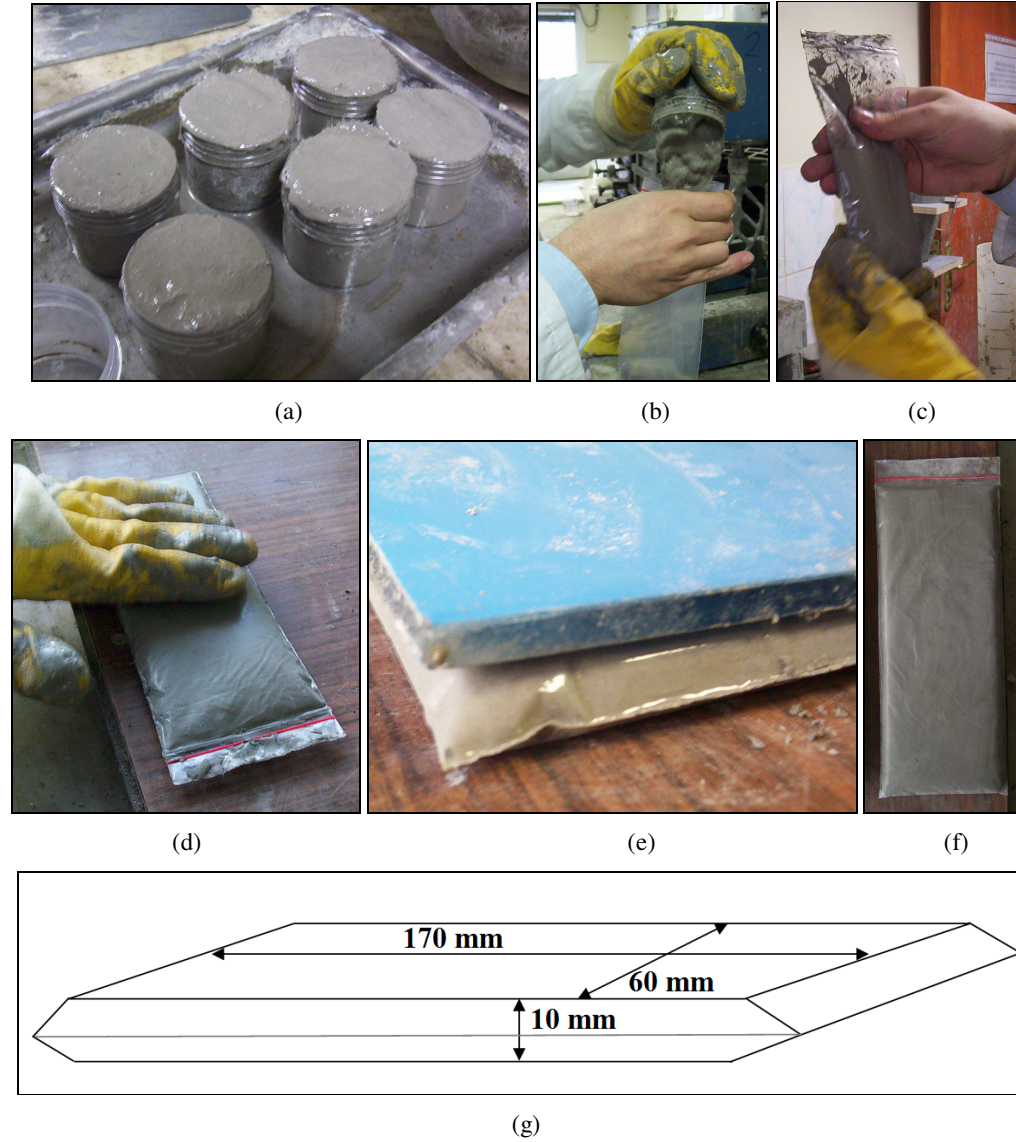
4.3.1 Mini Plaka Örneklerin Hazırlanması

Mini plaka örneklerin hazırlanmasında 180 mm boyunda ve 65 mm genişliğinde ağzı kilitlenebilir plastik poşetler kullanılmıştır. Örnek hazırlama aşamaları Şekil 4.27’de sunulmuştur. Hazırlanacak her örneğin aynı hacimde olmasını sağlamak amacıyla, karışımlar, Şekil 4.27a’da görülen 100 cm³ kapasiteli mika kaplara sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Daha sonra her bir kap içindeki malzeme kilitlenebilir plastik poşete doldurulmuştur (Şekil 4.27b). Poşete doldurulan karışım, poşet içinde sıkışık hava kalmayacak şekilde sıkıştırılmış ve poşetin ağzı kilitlenmiştir (Şekil 4.27c). Kilitlenen poşet içindeki malzeme, düz bir yüz üzerine yerleştirilmiş ve üzerine tabanla paralel konumda plaka ağırlık yerleştirilmiştir (Şekil 4.27d, 4.27e). Su terazisi yardımıyla plakanın tabanla paralelliği sağlanarak, karışımın eşit yükseklikte dağıtılması sağlanmıştır (Şekil 4.27f). Plaka örneklerinin kalınlıkları sabit ve 10 mm olarak ölçülmüştür. Her örnekte aynı hacimde malzeme kullanıldığı için aynı yükseklikte plaka üretmek mümkün olmaktadır. Örneklerin uzunluğu 170 mm, çizgisel yükün basacağı etkili genişlikleri 60 mm’dir (Şekil 4.27g). Hazırlanan örnekler bu konumda bir gün bekletildikten sonra plastik poşetler yırtılarak örnekler çıkartılmış ve suda 28 gün kür edilmiştir.

4.3.2 Örneklerin Yükleme Koşulları ve Yük-Sehim Eğrileri

Mini-plaka örneklerin hazırlanmasında kullanılan üç karışım ile I.aşamada hazırlanan 40*40*160 mm ayrıtlı örnekler, karşılaştırma yapmak amacıyla tekrar hazırlanmıştır. Bu örnekler ortadan tekil yükleme ile test edilmiş olup “A” yükleme koşulu ile simgelenmiştir. Aynı karışımlarla hazırlanan mini-plakaların, ortadan tekil yükleme ile test edilmesi “B” koşulu, açıklığın üçte bir aralığından çift yükleme ile test edilmesi ise “C” koşulu ile tanımlanmıştır. Deneylerde kullanılan deformasyon kontrollü cihaz ve yükleme koşulları I. aşama ile aynı olup, tüm serilerde açıklık 130 mm’dir. Yükleme açıklığı 130 mm ve plaka genişliği 60 mm olduğu için, yükleme

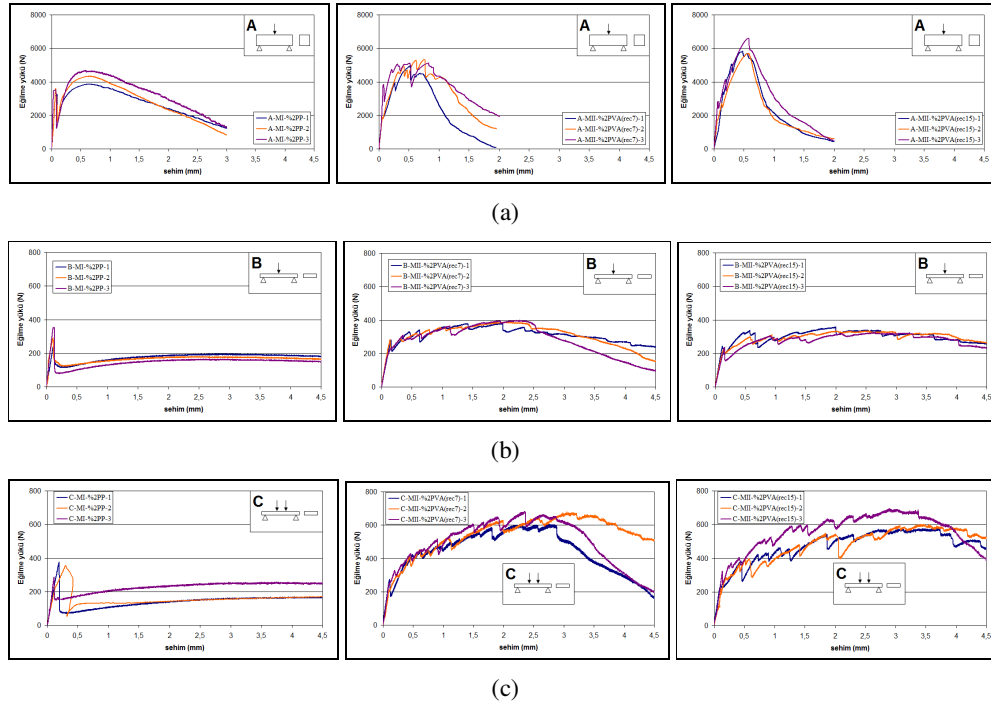
altındaki örneklerin uzun ayırının kısa ayırta oranı 2,17'dir. Bu değer 2'den büyük olduğu için örnekler yapısal açıdan “plak davranışı” göstermemekte olup, “basık kırış” olarak kabul edilebilir (Çatal, 2009). Ancak hazırlanan örneklerin şekli plakaya benzediği için “mini plaka” olarak adlandırılmıştır.



Şekil 4.27 Mini-plaka örneklerinin hazırlanma aşamaları.

Her örnek şekli ve yükleme koşulu için %2 Polipropilen ve %2 PVA (rec 7 ile rec 15 ayrı ayrı) lifli kompozitlerden elde edilen yük sehim eğrileri, soldan sağa doğru Şekil 4.28’de topluca sunulmuştur. Seçilen karışımların 40*40*160 mm ayrıtlı

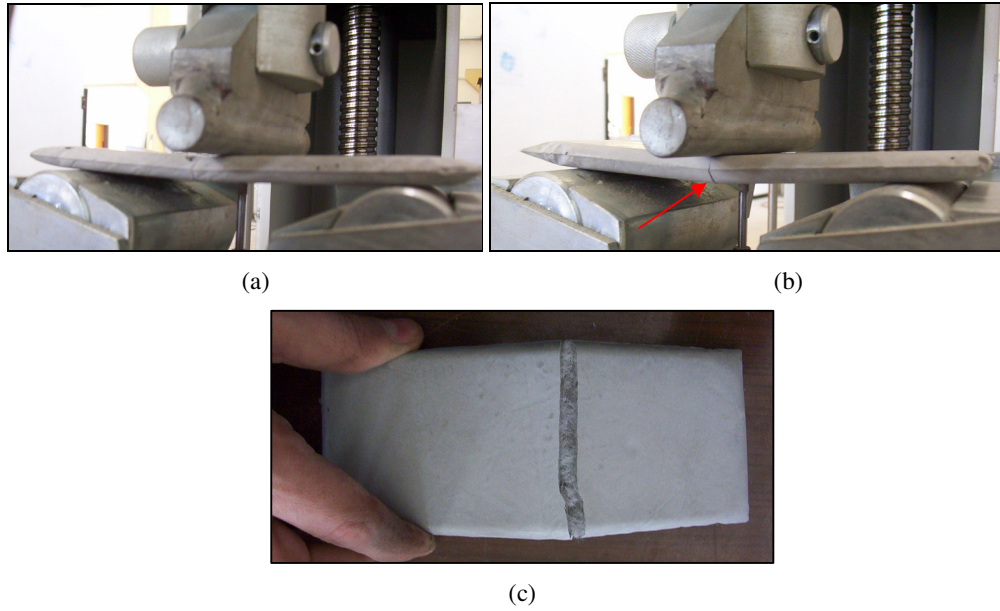
örneklerden elde edilen yük-sehim eğrilerinin birbirinden oldukça farklı olduğu görülmektedir (Şekil 4.28a). Bu örneklerin y-ekseni skalası 8000 N'a kadar çıkmaktadır.



Şekil 4.28 Üç farklı yükleme koşulunda %2 Polipropilen ve PVA (rec 7 ve rec 15) lifli kompozitlerden elde edilen yük sehim eğrileri.

Plaka örneklerin yüksekliklerinin 10 mm olması nedeniyle yük taşıma kapasiteleri daha düşük olduğundan, yük-sehim eğrilerinin y-ekseni skalası 0-800 N aralığında verilmiştir (Şekil 4.28b, 4.28c). Mini-plaka örneklerin ortadan yüklendiği “B” koşulundaki performansları incelendiğinde, %2 PP lifli örneklerin yaklaşık 380 N’lık bir yükte, ortadan çatlama ile ani yük kaybettikleri ve tekrar aynı yük seviyesine çıkamadıkları görülmektedir (Şekil 4.28b). Şekil 4.29’da %2 PP lifli kompozitin yükleme öncesinde, 4,5 mm sehimde ve örnek ikiye ayrılacak kadar büküldükten sonra çekilen fotoğrafları verilmiştir. Açıklık ortasından yüklemenin meydana getirdiği tekil çatlak fotoğrafta görülmektedir. Diğer taraftan, daha kalın olan 40*40*160 mm ayrıtlı örneklerle yapılan deneylerde ilk çatlak sonrası yük düşüşü meydana gelmiş, çatlağın açtığı kesitteki liflerin sıyrılarak yük taşımaları ile birlikte eğilme yükü, tekrar ilk çatlak yükünün üzerine çıkabilmiştir (Şekil 4.28a). Bu sonuç

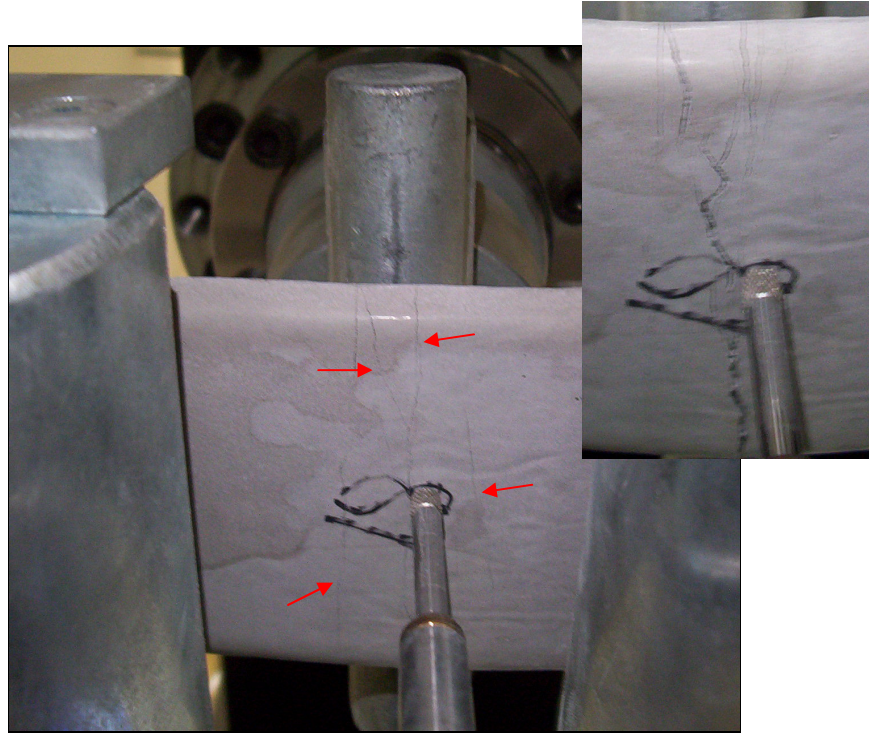
PP lifli mikro betonların plaka formunda kullanılması halinde performansının, daha kalın örneklerde kullanılması durumundan daha zayıf olacağını göstermektedir. Benzer şekilde “C” koşulu olarak adlandırılan çift nokta yüklemesinde de PP liflerin düşük performanslı olduğu görülmektedir. Çatlama, uygulanan noktasal yükler arasında meydana gelmiştir. Liflerin artan sehim değeri ile taşıdıkları yük seviyesi hiçbir zaman ilk çatlak yükü seviyesine ulaşamamıştır (Şekil 4.28c).



Şekil 4.29 Polipropilen lifin %2 oranında kullanıldığı MI matrisli mini-plakanın ortadan tekil yükleme deneyi fotoğrafları; a) Yükleme öncesi, b) Yükleme sonu (4,5mm), c) İkiye ayrılmış görüntüsü.

Mini-plaka örneklerin ortadan yüklendiği “B” koşulundaki performanslar açısından, PVA liflerinin (rec 7 ve rec 15) kullanıldığı kompozitler incelendiğinde, PP lifli kompozite kıyasla farklı bir davranış söz konusudur (Şekil 4.28b, 4.28c). Her iki kompozitte ilk çatlak sonrasında, sehim artışı ile birlikte çok sayıda yeni çatlak oluşmasını sağlamıştır. Üstelik bu çatlaklar oluşurken yük seviyesi uzun bir süre 250-400 N arasında kalmaktadır. Plaka formundaki kompozitlerde çoklu çatlak potansiyeli, tekil yükleme yapılmasına rağmen tüm örneklerde gözlenebilmektedir. Şekil 4.30’da %2 rec7 lifinin kullanıldığı MII matrisli kompozitin tekil yükleme sırasında alt kısmından çekilmiş fotoğrafı verilmiştir. Bu fotoğrafta yükün açıklık ortasında yoğunlaşmasına rağmen ortaya çıkan çatlaklar görülmektedir. Liflerin

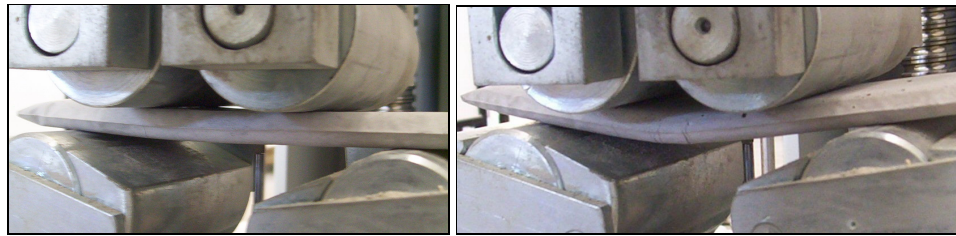
güçlü olması matriste yükü yayarak gerilmeyi kesit ortasından kenarlara yaymaktadır. Böylece kompozitin tokluk performansı, örnek ince plaka şeklinde olmasına rağmen artmaktadır (Şekil 4.28b, 4.28c). Bu örneklerde yük düşüşü “A” koşulunda incelenen kalın örneklerle kıyasla çok daha yüksek sehim değerlerinde başlamaktadır.



Şekil 4.30 %2 rec7 lifinin kullanıldığı MII matrisli kompozitin, tekil yükleme sırasında alt kısmından çekilmiş fotoğrafı (sağ üst köşede deneyin sonunda açılan tek ana çatlak ve diğer çatlakların kapanması görülmektedir).

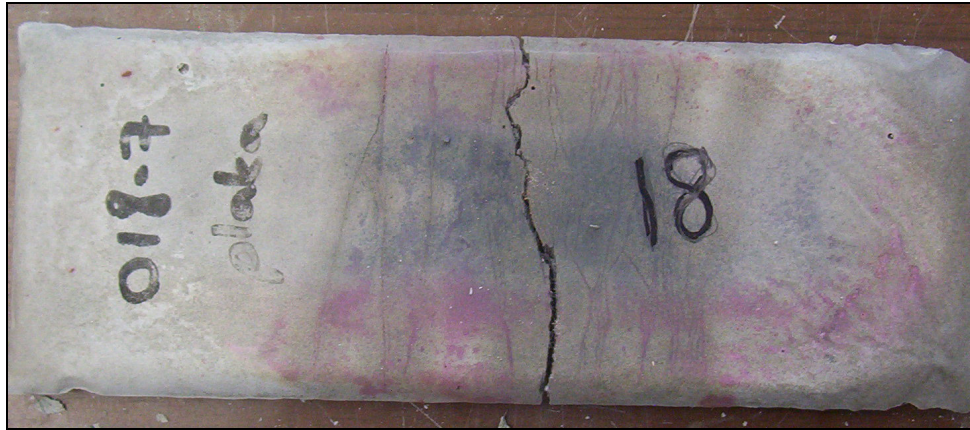
Örneklerin çift noktalı yüklenmesinde PVA lifli kompozitlerden elde edilen sonuçlar, PVA liflerin yayılı yükleme koşulunda kompozit performansını daha da arttırdıklarını göstermiştir. Bu artışın temel nedeni yükleme noktaları arasında kalan bölgede, sabit bir eğilme momenti oluşması ve kesme kuvvetinin olmadığı bu bölgede kompozitin en alt bölgesinin saf çekme gerilmesi etkisinde olmasıdır. Deneyler sırasında yapılan gözlemlerde söz konusu bölgede çok sayıda paralel çatlakların oluştuğu belirlenmiştir. Şekil 4.31’de deney sonrası bir örnekte çatlakların boya ile doldurulması sonrasında çekilen fotoğraf verilmiştir. Bazı örneklerde yük seviyesinin düşmesi için yükleme 7-8 mm sehime kadar devam ettirilmiştir. Bu

nedenle 4,5 mm'ye kadar olan yük-sehim eğrileri verilmiştir. Deney sonunda tek bir çatlak açılıp, diğer çatlaklar kapandığı için, diğer çatlakları gözlemek oldukça güç olmaktadır. Bu nedenle boya kullanılarak çatlaklar görünür hale getirilmeye çalışılmıştır. Fotoğraftan verilen örnek üzerinde 30'a yakın çatlak saymak mümkündür. *Çatlakların özellikle iki yükleme arası bölgede oluşması, yükün lifler tarafından ne derece etkili dağıtıldığıının ispatıdır. Çatlak sayısı ne kadar çok olursa, artan sehimde yük taşıma kapasitesi o kadar yüksekte kalacaktır. Belli bir sehim kadar, yeni açılan çatlaktan yük köprülemeye destek olan her lif, yük taşıma kapasitesini arttıracaktır. Çift noktadan yüklenen kompozitler, çatlaklar oluştuğu 3-3,5 mm sehim değerine kadar "deformasyon sertleşmesi" davranışı göstermekte ve yük değeri 600-650 N'a kadar çıkmaktadır. Ayrıca yükün düşmesi için daha önce de belirtildiği gibi 7-8 mm sehim kadar yükleme gereklidir.*



(a)

(b)

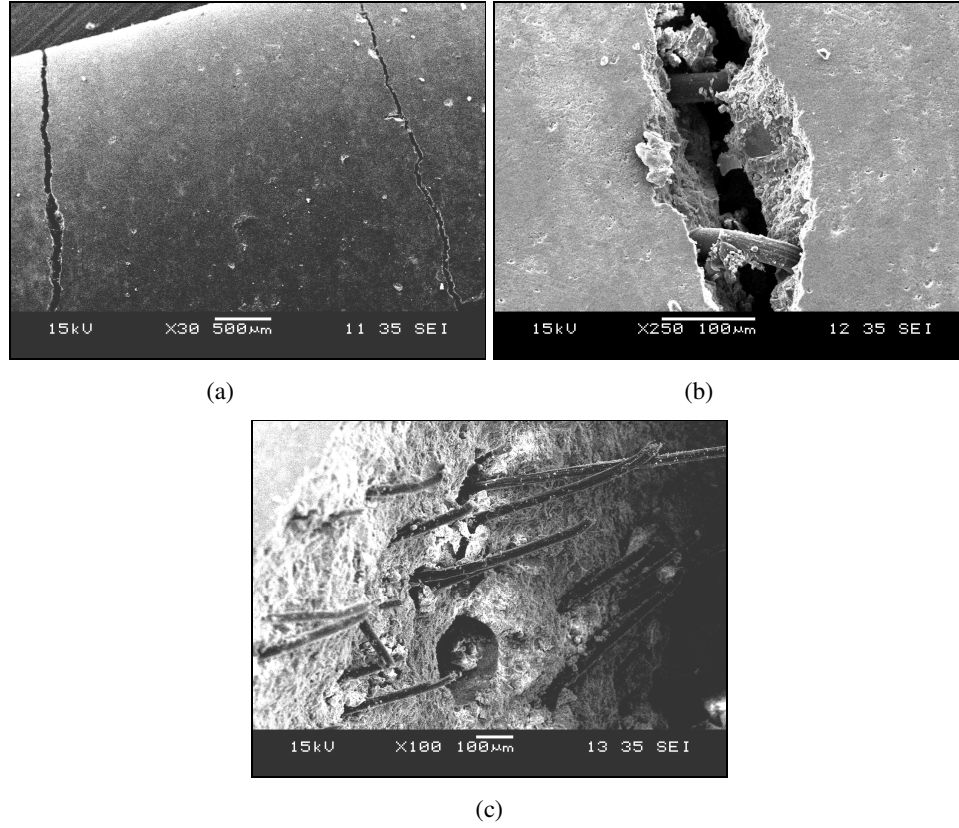


(c)

Şekil 4.31 İki noktadan yüklenen %2 rec7 lifinin kullanıldığı MII matrisli plaka fotoğrafları,

a) Yükleme öncesi, b) Yükleme sonu (4.5mm), c) İkiye ayrılmış görüntüsü.

Plaka formundaki örneklerde PVA (rec7) lifli karışımların yüksek performansının nedenini araştırmak amacıyla, iki çatlak arası mesafenin yaklaşık 3 mm olduğu bir parça taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir (Şekil 4.32).



Şekil 4.32 Plaka formundaki %2 PVA (rec7) lifli örnekten alınan parçanın taramalı elektron mikroskobu fotoğrafları; a) Paralel çatlaklar, b) Liflerin çatlak köprülemesi, c) Liflerin kopması.

Bu parçanın 30 kat büyütme fotoğrafında çizgisel yüklemeye paralel çatlaklar görülmektedir (Şekil 4.32a). Çatlaklar daha yakından incelendiğinde, yaklaşık 100 mikron genişliğe ulaşan çatlak içinde köprüleme vazifesi gören rec7 lifleri açıkça seçilmektedir (Şekil 4.32b). Kompozitin kalınlığının az olması nedeniyle bu çatlaklar düşük yük seviyelerinde oluşmuş ve açığa çıkan lifler düşük yük seviyelerinde çatlağı köprülemiştir. İncelenen çatlakların genişliği 50-100 mikron arasında değişmektedir. Çatlağın köprülenmesi sırasında yük seviyesi düşük olduğu için, rec7 lifleri *daha erken devreye girmektedir*. Bu lifler, büyük sehim değerlerine kadar yeni

çatlakların açılmasını sağlayacak yükleri matriste yayabilmiştir. Kalın örneklerde ise, en alt kesitteki lifler çok daha yüksek yük değerlerine maruz kaldığı için, belli bir sehimden sonra kopma olasılıkları artmaktadır. Plaka örneklerde ise, rec7 liflerinin az da olsa kopmadan önce bir miktar sıyrılma ve uzama gösterdikleri belirlenmiştir. Ancak bu liflerin göçme modu, yüksek sehim değerlerine ulaştıktan sonra, ağırlıklı olarak kopma şeklinde gerçekleşmektedir (Şekil 4.32c). Sonuç olarak, plaka gibi ince örneklerde, uygun PVA liflerin kullanılması halinde çoklu çatlak performansının daha belirgin olarak gözlenebileceği ortaya konulmuştur. Aynı zamanda yüklemenin yayılı olması halinde, söz konusu liflerin tokluk ve çoklu çatlak performansı önemli derecede artmaktadır.

Hazırlanan örneklerin farklı geometrilerde olması, matris dayanımının gelişimi açısından farklılıkları da beraberinde getirmektedir. Hidratasyon reaksiyonlarının gelişiminde dış kürün etkisi, plaka formundaki örneklerde çok daha belirgin iken, göreceli olarak daha kalın olan prizmatik örneklerde kürün etkisi derinlere gidildikçe azalmaktadır. Ayrıca örneklerin kalıba yerleştirilmesinde ve sıkıştırılmasında kullanılan yöntemlerin farklılığı, aynı karışımlar kullanılmasına rağmen, sıkıştırma dereceleri arasında farklılıklar yaratmaktadır. Söz konusu nedenlerden dolayı da örneklerin performansları arasında farklılıklar olması mümkündür.

Mini-plaka ve prizmatik örneklerden elde edilen bulgular, lifli kompozitlerde çatlamış kirişin eylemsizlik momenti açısından önemli farklılıkların olduğunu göstermektedir (Çatal, 2009). Bu kapsamda, çatlamış kirişin eylemsizlik momenti, lifli kompozitler için incelenebilir (Yelgin ve Yalman, 2007). Ancak bu konu tez kapsamı dışında olduğu için yalnızca öneriler bölümünde yer verilmiştir.

4.4 Seçilen Matris – Lif Kombinasyonlarının Ayrıntılı Yük-Sehim Eğrisi İncelemeleri (II. Aşama)

I. aşamada incelenen lif-matris kombinasyonlarından yüksek lif dozajının çoklu çatlak potansiyelini önemli derecede arttırdığı belirlenmiştir. Ancak yüksek lif dozajları hem perdahlanabilirliği zorlaştırmakta hem de maliyeti arttırmaktadır. Bu

bölümde sadece %1 PP ve %1 PVA lifinin, lif topaklanması açısından, en iyi sonuçları veren matrislerdeki (MI ve MII) performansı ayrıntılı şekilde incelenecektir. Lif dozajının %1 olması durumunda mikro beton kompozitlerin performansları belirlenecektir.

4.4.1 İncelenen Karışımlar ve Örneklerin Hazırlanması

II. aşama deneylerde, bir önceki aşamada incelenen dört PVA lifi arasından en iyi performansı veren rec15 lifi kullanılacaktır. Karşılaştırma amacıyla lifsiz matrisler ve standart harç ($S/C/K=0.5/1/3$) kullanılarak farklı kompozitler hazırlanmıştır. Tablo 4.9’da incelenen tasarımlar ve bu aşamada kullanılan kodlama verilmiştir.

Tablo 4.9 İncelenen karışımlar ve kodları.

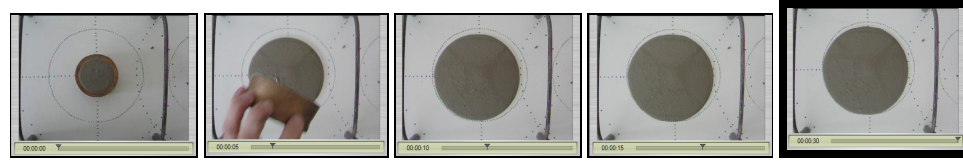
Standart harç	SH		
Mikro beton I	MIK	Mikro beton II	MIIK
PP lifli mikro beton I	MIPP	PP lifli mikro beton II	MIIPP
PVA lifli mikro beton I	MIPVA	PVA lifli mikro beton II	MIIPVA

MI ve MII matrisli mikro beton örneklerin hazırlanmasında I.aşamadaki karışım oranları kullanılmıştır. II. aşama deneylerde kullanılan çimento CEM I 42,5R olmasına rağmen, I. aşamadaki çimento ile farklı partidendir. Bu nedenle yayılma çaplarında değişiklikler söz konusu olmuştur. Uygun yayılma çapının elde edilmesi için akışkanlaştırıcı katkı dozajı MI matrisi için %1,2’ye, MII matrisi için ise %1,4’e (toplam bağlayıcının %’si) çıkartılmıştır. Bu aşamada yapılan incelemelerde yayılma çaplarını karakterize etmek için, reolojik incelemelerde kullanılan video kameralı kıvam kaybı prosedürü uygulanmıştır.

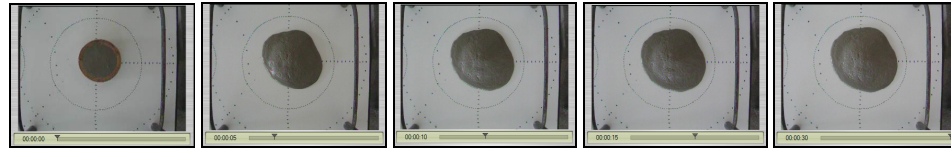
Mikro beton karışımları Hobart mikser kullanılarak hazırlanmıştır. Karıştırma süresi 30 saniye kuru karışım (ilk seride sadece çimento vardı ancak ilerideki serilerde kalker ilavesi de olacağından kuru karışım için süre bırakılmıştır), polikarboksilat bazlı akışkanlaştırıcı katkı ve su ilavesi ardından 2 dakika daha karıştırma işlemi yapılmıştır. Lif ilavesi yapılan serilerde karıştırma süresi 2 dakika

daha uzun tutulmuştur. Çünkü özellikle düşük S/Ç oranlı ve yüksek katkı dozajlı karışımlarda katkının tam olarak verimli çalışması ve lifin yaratacağı kıvam kaybını azaltması karıştırma süresinin yeterliliğine bağlıdır (Chopin ve diğer., 2004). Hazırlanan karışımlar yayılma çapı ölçüm kalıbı içine kendi ağırlığı ile yerleşecek şekilde iki tabaka halinde boşaltılmıştır. Lif dozajı %1 olduğu için karışımlar kolay yerleşebilir kıvamdadır. Akıcı kıvamdaki karışımların yayılma çapı değişimi video kamera ile kaydedilmiştir. Karışımların tiksotropi derecelerini ayırt etmek amacıyla her karışım için yapılan deney, aynı tabla üzerinde 5 dakika gecikmeli olarak tekrarlanmıştır. Böylece tiksotropinin sadece 5 dakika içinde bazı karışımlarda nasıl bir davranış farklılığına yol açtığı gösterilmiş olacaktır. Elde edilen sonuçlar sırasıyla MIK, MIPP, MIPVA, MIIK, MIIP, MIIPVA için Şekil 4.33-4.38’de verilmiştir. Şekillerde ilk ve beş dakika gecikmeli görüntüler alt alta görülmektedir. *Tiksotropi kaybı aynı miktarda su ve akışkanlaştırıcı kullanılan lifsiz karışımlarda daha yüksek seviyelerde iken, lifli karışımlar daha uzun süre karıştırıldıkları için tiksotropi dereceleri bir miktar daha düşük olmuştur. Lifsiz karışımlarda tiksotropi derecesi yüksek olduğundan, kalıba yerleştirilme sırasında geçen zamanda karışımın hızla kıvam kaybetme potansiyeline sahip olduğu söylenebilir.* Şekil 4.39’da bu durumun yarattığı farklılık açıkça görülmektedir. Şekil 4.39a ve 4.39b’de lifli karışımların tiksotropi dereceleri düşük iken, lif içermeyen karışımlarda kayıplar oldukça yüksek mertebelerdedir. Yapılan ön denemeler sonucu, lifli kendiliğinden yerleşen mikro betonda tiksotropi ve ayrışmayı en aza indirmek için gerekli akışkanlaştırıcı miktarları, karıştırma yöntemi ve matris tipine bağlı olarak belirlenmiştir.

Diğer taraftan, eğilme deneyleri için örnek alınırken, PVA liflerin perdahlanabilirlikte PP liflere kıyasla daha avantajlı olduğu görülmüştür. PP liflerin düşük yoğunluğu, bu liflerin yüzeyde toplanmalarına yol açmaktadır. Bu durum perdahlanabilirliğini PVA liflere kıyasla zorlaştırmaktadır.



(a)

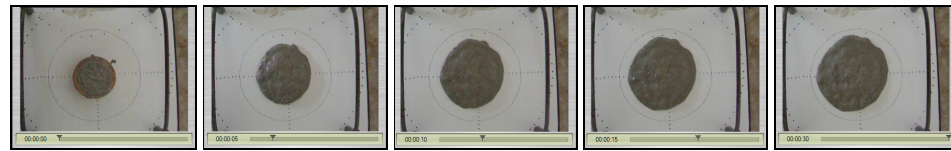


(b)

Şekil 4.33 MI-K karışımının belirtilen karıştırma yöntemi ile hazırlandıktan, a) hemen sonraki, b) beş dakika sonraki yayılma çapı gelişimi.

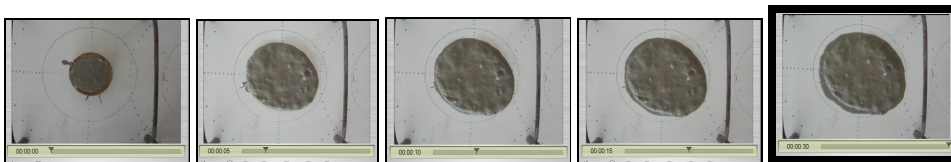


(a)

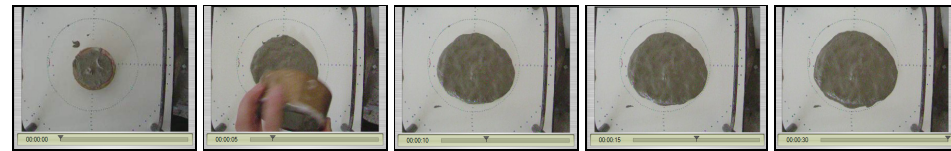


(b)

Şekil 4.34 MI-PP karışımının belirtilen karıştırma yöntemi ile hazırlandıktan, a) hemen sonraki, b) beş dakika sonraki yayılma çapı gelişimi.

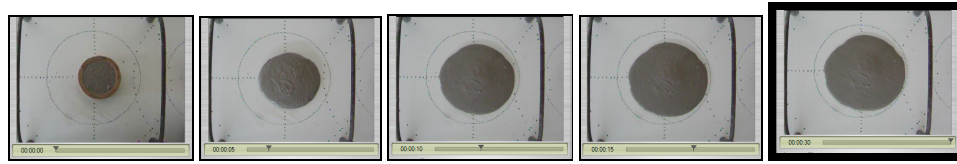


(a)



(b)

Şekil 4.35 MI-PVA karışımının belirtilen karıştırma yöntemi ile hazırlandıktan, a) hemen sonraki, b) beş dakika sonraki yayılma çapı gelişimi.

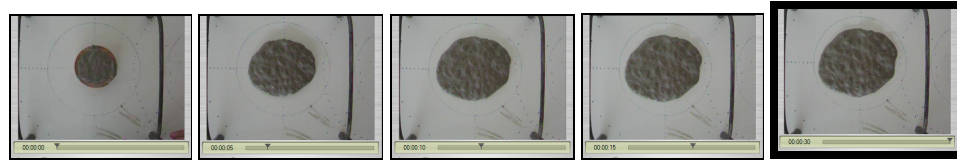


(a)

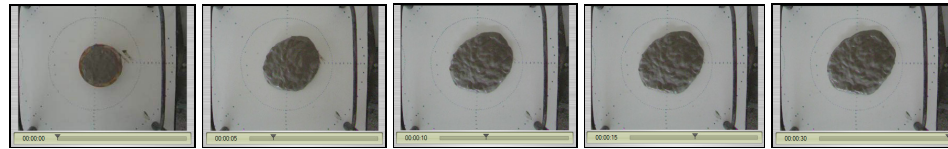


(b)

Şekil 4.36 MII-K karışımının belirtilen karıştırma yöntemi ile hazırlandıktan, a) hemen sonraki, b) beş dakika sonraki yayılma çapı gelişimi.

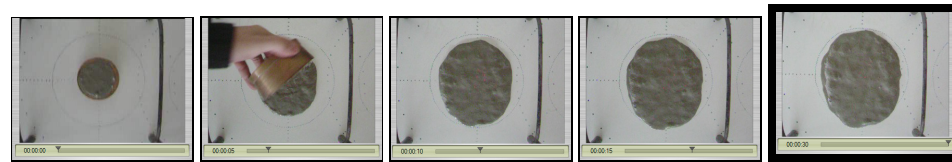


(a)



(b)

Şekil 4.37 MII-PP karışımının belirtilen karıştırma yöntemi ile hazırlandıktan, a) hemen sonraki, b) beş dakika sonraki yayılma çapı gelişimi.



(a)

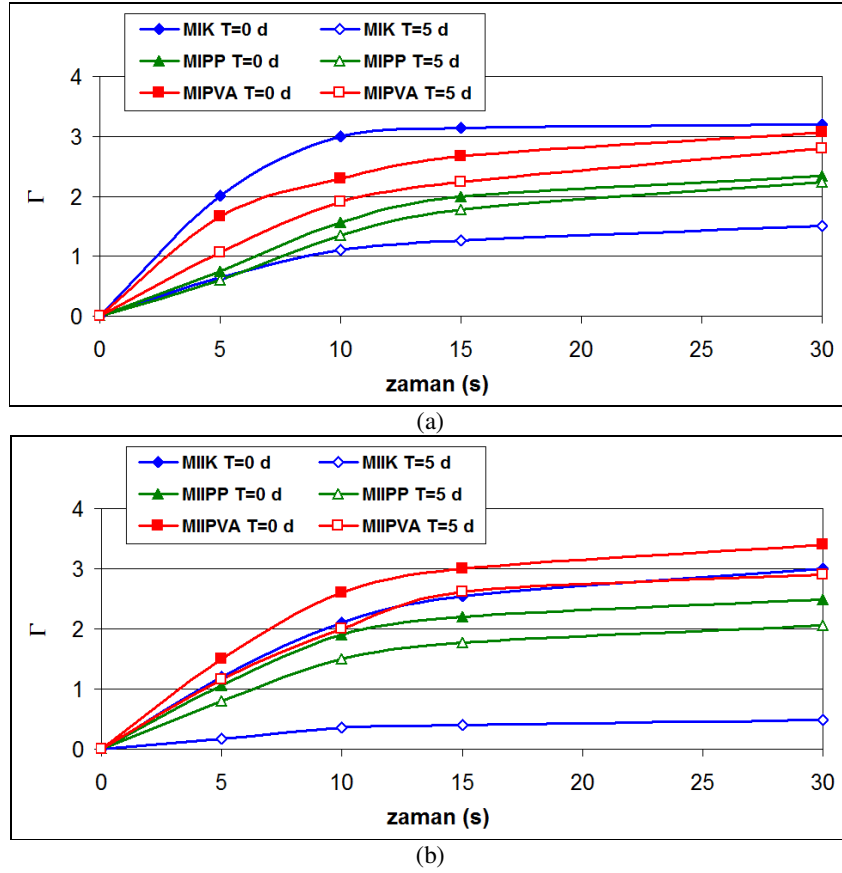


*

(b)

Şekil 4.38 MII-PVA karışımının belirtilen karıştırma yöntemi ile hazırlandıktan, a) hemen sonraki, b) beş dakika sonraki yayılma çapı gelişimi.

* gecikmeli yayılma videosundan fotoğraf alınamamıştır.



Şekil 4.39 Bağlı yayılma oranı (Γ) değerlerinin zamana bağlı değişimi.

(Karışımlar hazırlandıktan hemen sonra; T=0 d, beş dakika gecikmeli; T=5 d)

4.4.2 Yük - Sehim Grafiklerine Lif İlavesinin Etkisi

Mikro betonlara lif ilavesinin yük-sehim grafiklerine etkisini incelemek amacıyla, her seriden 12 adet 40*40*160 mm ayrıtlı prizmatik örnekler hazırlanmıştır. Bu örneklerden yarısı 2 ay suda bekletilmiştir. Diğer yarısı ise, ilk 1 ay suda bekletildikten sonra üç kez 1000 N'luk eğilme yükü ile ortadan yüklenip boşaltılmıştır. Bu işleme “ön yükleme” adı verilmiştir. Buradaki amaç, prizmatik örnekler uygulanan ön yüklemenin, örneklerin yük-sehim performanslarını etkileyip etkilemeyeceğinin tespit edilmesidir. Ön yüklemeli örneklerin isimlendirmesinde “-Ö” eki kullanılmıştır (Tablo 4.10). İki ay sonunda örneklerin yük-sehim grafikleri I.aşamada kullanılan deplasman kontrollü bir pres ve encoder yardımıyla elde edilmiştir. Deney koşulları da önceki aşama ile aynı tutulmuştur. Farklı olarak

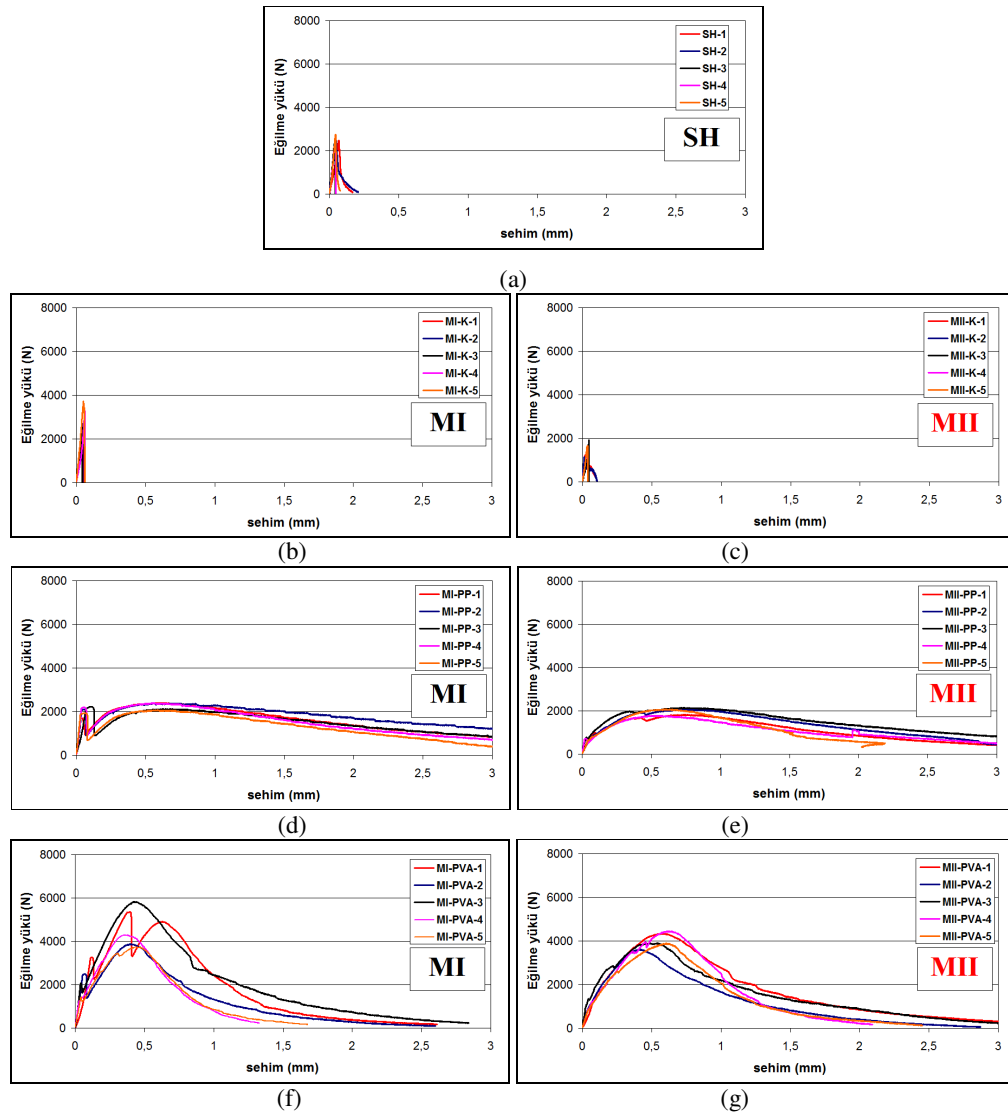
örnekler 3 mm sehime kadar yüklenmiştir. Elde edilen grafiklerden her örneğin ilk çatlak dayanımı, ilk çatlak yükü sehim, eğilme dayanımı, maksimum yükteki orta nokta sehim, 1,3 mm ve 3 mm sehim değerinde yük-sehim grafiği altında kalan alan (eğilme tokluğu) hesaplanmıştır. Ayrıca tüm örnekler kırılma sırasında incelenmiş, örnekler üzerinde oluşan gözle görülebilir çatlaklar fotoğraflandırılmıştır. Bu sayede tüm örneklerin göçme mekanizmaları, lif ve matris tipi dikkate alınarak yorumlanmıştır.

Tablo 4.10 Suda 2 ay bekleme sonrası eğilme deneyi yapılan seriler.

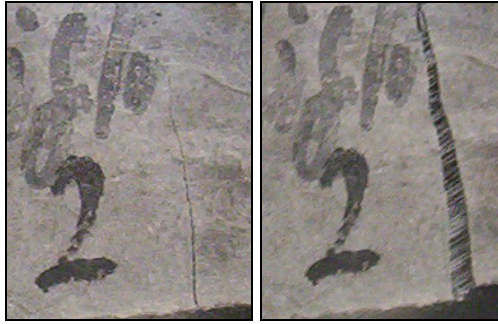
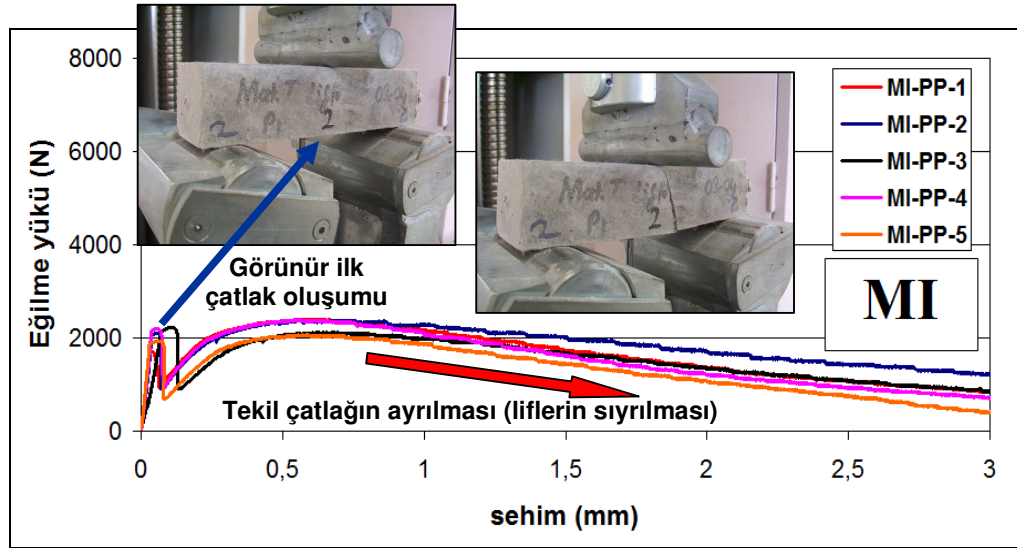
Ön yüklemesiz	Ön yüklemeli
SH	SH-Ö
MIK	MIK-Ö
MIPP	MIPP-Ö
MIPVA	MIPVA-Ö
MIİK	MIİK-Ö
MIIPP	MIIPP-Ö
MIIPVA	MIIPVA-Ö

Suda iki ay bekleyen ve ön yükleme yapılmadan deneyi gerçekleştirilen örneklerin yük-sehim grafikleri toplu olarak Şekil 4.40'da sunulmuştur. Standart harç, MIK ve MIİK örnekleri oldukça gevrek bir davranış göstermiştir (Şekil 4.40a-c). Bu örneklerde sehim değerleri 0,1 mm'nin altında iken ilk çatlak oluşmuş ve yük artışı bu seviyeden sonra gözlenmemiştir. Standart harç örneklerinin bazılarında kuyruk kısmı oluşurken, lif içermeyen ve bağlayıcısı sadece çimento olan mikro betonlarda ani yük düşüşü oluşmuş ve kuyruk kısmı gözlenememiştir (Şekil 4.40b-c). Bağlayıcısı %50 uçucu kül olan mikro betonlarda ise, eğilme dayanımı daha düşük mertebelerde kalmış, ancak kuyruk kısmı bir miktar oluşmuştur (Şekil 4.40c). Öte yandan lifli mikro betonlarda ilk çatlak sonrası davranış farklılık göstermektedir. Her lif ve matris tipi için ayrı ayrı inceleme yapılmıştır. Polipropilen lif ve MI matrisi kullanılan örneklerde ilk çatlak oluşumunda ani bir yük düşüşü gözlenmiştir (Şekil 4.40d). Meydana gelen yük düşüşünün ardından, çatlağın açıldığı kesitteki polipropilen lifler çatlak köprüsü oluşturarak yük almaya başlamıştır. Bu esnada sıyrılma ve uzama yapan lifler, kompozitin yük taşıma kapasitesini arttırarak ilk çatlak dayanımının daha üstüne çıkartmıştır. Örneklerin yaptığı sehim 3 mm'ye

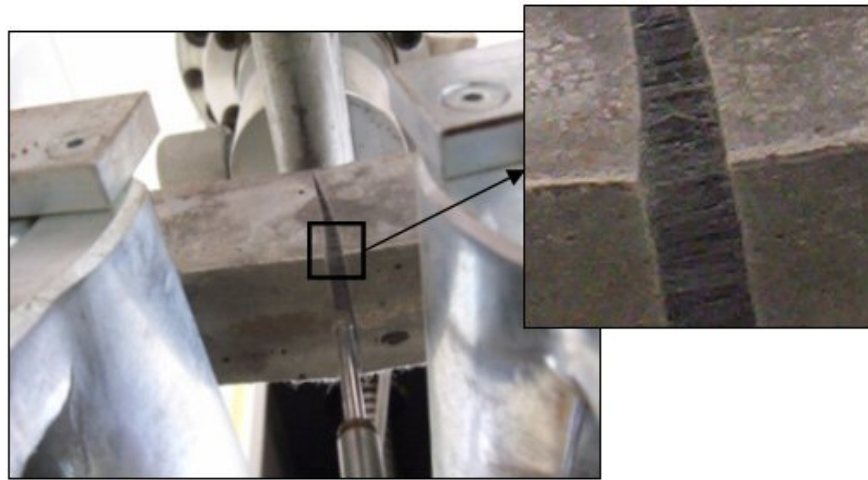
ulaşmasına rağmen, 1000 N'luk bir kuvvet lifler tarafından taşınabilmektedir (Şekil 4.41). Deney süresince ilk oluşan çatlak genişlemiş, başka bir çatlak açılması olmamıştır. Çatlak açıklığında liflerin gergin şekilde olduğu, uzadığı ve/veya sıyrıldığı gözlenmiştir (Şekil 4.42). Güçlü bir matris olan (Basınç dayanımı ortalama 70-80 MPa, ilerideki bölümlerde verilecektir) MI matrisinde oluşan ilk çatlak, yüksek bir eğilme yükünde meydana geldiği için, çatlama çok ani oluşmakta, lifler bu ani çatlakla tutamayarak yaklaşık 1000 N'luk ani yük düşüşüne neden olmaktadır.



Şekil 4.40 Standart harç (a), lifsiz mikro betonlar (b,c), PP lifli (d,e) ve PVA lifli (f,g) örneklerin yük-sehim grafikleri.


 $\delta = 0.2 \text{ mm}$
 $\delta = 2 \text{ mm}$

Şekil 4.41 MI matrisine %1 PP lifi ilave edilerek hazırlanan kompozitin yük-sehim grafiği ve sehime bağlı çatlak açılması.

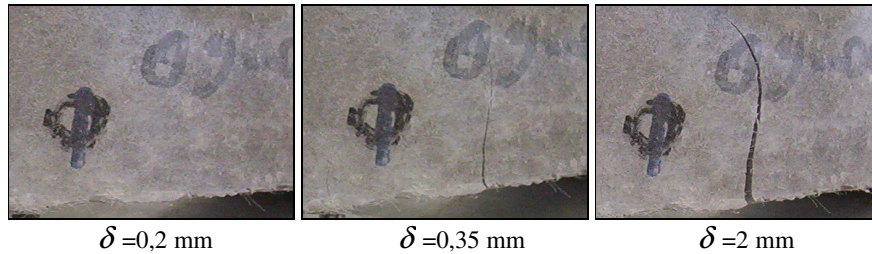
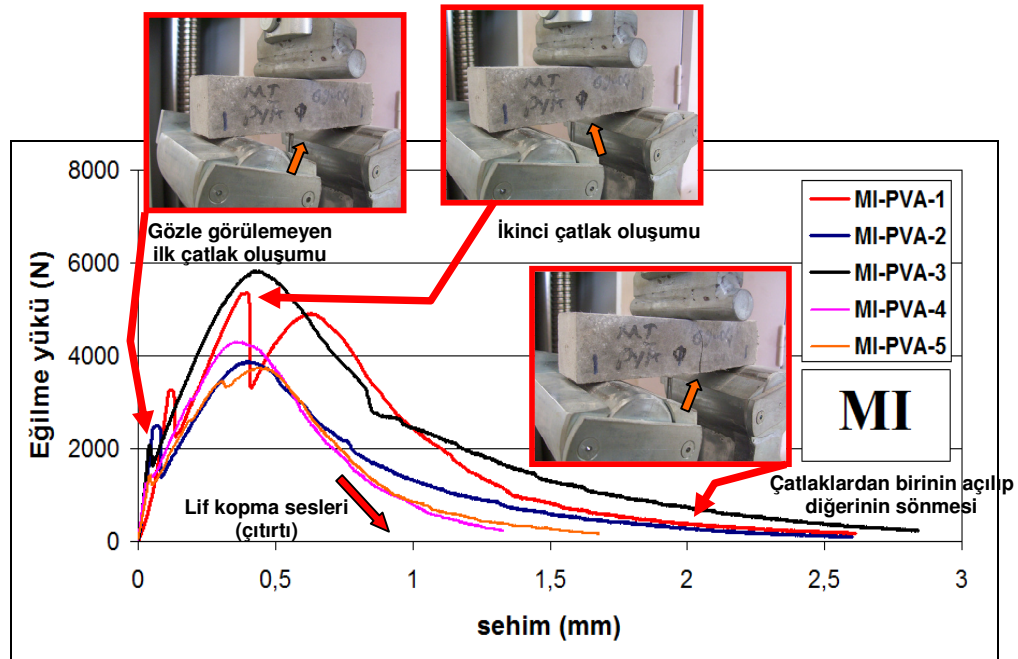


Şekil 4.42 Eğilme deneyi esnasında alttan çekilen gergin PP lifli matris fotoğrafı (MIPP).

Diğer taraftan uçucu kül içeren ve nispeten daha zayıf bir matris olan (Basınç dayanımı ortalama 35-40 MPa, ilerideki bölümlerde bilgi verilecektir) MII matrisinde oluşan ilk çatlak merteye olarak daha düşük seviyelerde olduğundan, bu matristeki PP lif içeren örneklerde ani yük düşüşü gözlenmemiştir (Şekil 4.40e). İlk çatlak yükü ve sehim bu örneklerde eğim değişiminden belirlenmiştir. Matristen PP lifin sıyrılması da uçucu külün lif-matris ara yüzeyinde yarattığı pozitif etki sayesinde zorlaşmış ve bazı örneklerde birden çok sayıda çatlak oluşmasını sağlamıştır. Uçucu kül ile $\text{Ca}(\text{OH})_2$ arasında meydana gelen puzolanik reaksiyon sonucu oluşan ürünler lif-matris ara yüzeyindeki nispeten boşluklu bölgenin dolmasını sağlamaktadır. Böylece lif-matris aderansında artış sağlanabilir (Li, Kong ve Chan, 1998, Lepech, Keoleian, Qian ve Li, 2008, Şahmaran ve Li, 2008, Lepech, Li, Robertson ve Keoleian, 2008). Bu olay, matris tipinin ve lif ile matris yüzey özelliklerinin lif-matris uyumu açısından önemini göstermektedir.

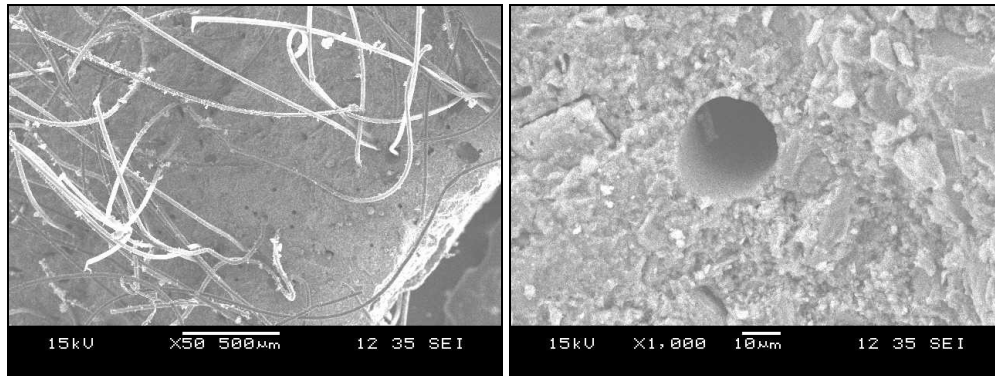
Şekil 4.40f’de ise PVA lifli MI matrisi kullanılarak hazırlanan örneklerin yük-sehim grafikleri görülmektedir. Bu grafiklerdeki yük-sehim davranışı PP lifli serilerden oldukça farklıdır. Şekil 4.43’de tekrar verilen yük-sehim eğrisi üzerinden işaretlemelerle farklılıklar açıklanacaktır. İlk çatlak yükü seviyesi benzerlik gösterirken, ilk çatlak sonrası yük taşıma performansı PVA lif içeren MI matrisinde daha fazladır. Aynı zamanda ilk çatlak sonrası liflerin köprülediği yükün artması ile birlikte yeni çatlakların oluşması söz konusudur. Bu aşamada eğilme yükü azalıp tekrar artan bir karakterdedir. Bu durum yük-sehim grafiğinin ön kısımlarında zik-zak formunda oluşumla gözlenmektedir. İlk çatlak ortaya çıktığı anda (yük düşüşü gözlemlendiği an), oluşan çatlak genişliği gözle görülemeyecek kadar dardır. Örnek bir miktar sehim yaptıktan sonra gözle görülür açıklığa ulaşmaktadır. Çatlak sayısı arttıkça zik-zak formundaki oluşum artmakta ve yüksek sehim değerlerinde bile yük taşıma kapasitesi yüksek seviyelerde kalmaktadır (Şekil 4.43). Yük düşüşünün meydana geldiği kuyruk bölgesinde açılan çatlaklardan birisi genişlemekte, eğer var ise diğer çatlaklar tekrar kapanarak gözle görülemez boyuta inmektedirler. Bu durum Şekil 4.37’de verilen örnekte meydana gelen ikinci çatlakta söz konusudur. Çatlak gözle görülecek genişliğe ulaşmadan, ana çatlağın genişlemesi nedeniyle

kapanmıştır. Ancak bazı örneklerde ikinci çatlak oluşumu meydana gelmeden yük seviyesi düşüşe geçmekte ve matris tek çatlakla açılması ile göçmektedir. Bu durum içyapıdaki kusurlu bölgelerin rastgele dağılımı ile yakından ilişkilidir. Özetle %1 PVA lifli içeren kompozitlerde her zaman çoklu çatlak görülme garantisi yoktur. PVA lifli matrislerde çatlak sayısını arttırmak için, iç yapıdaki kusurlu bölge dağılımını da yaymak gerekir (Li, ve diğer. 2002). PVA lifli içeren örneklerde, yük-sehim eğrisinin kuyruk bölgesinde liflerin koparak göçtüğü ve örneklerden çıktırı sesleri geldiği belirlenmiştir (Şekil 4.43). Diğer taraftan, PP lifli matrislerde lifler sıyrılmakta ve uzamakta iken böyle bir ses ortaya çıkmamaktadır.

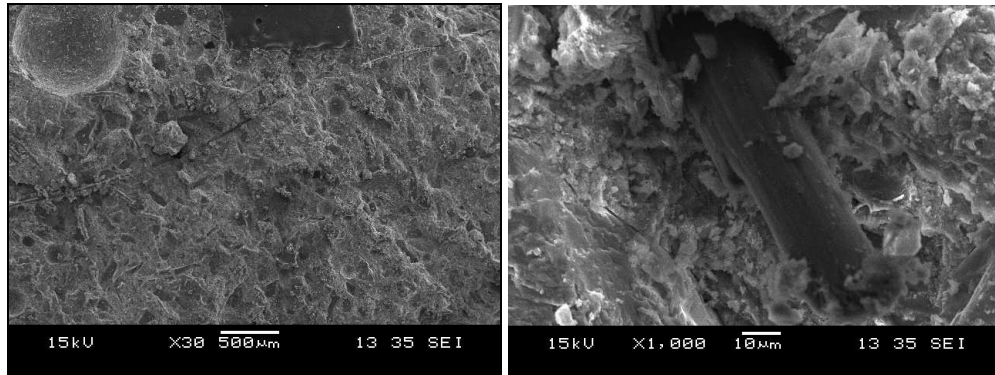


Şekil 4.43 MI matrisine %1 PVA lifi ilave edilerek hazırlanan “MIPVA-1” kompozitin yük-sehim grafiği ve sehime bağlı çatlak açılması (kompozitte oluşan ikinci çatlak gözle görülebilir genişliğe ulaşmadan kapanmıştır).

PP ve PVA lifli matrislerin kırık parçaları üzerinde yapılan taramalı elektron mikroskobu incelemelerinde, makro boyutta gözlenen bu olayın, mikro boyutta da gerçekleştiği ispatlanmıştır (Şekil 4.44). İkiye ayrılmış PP lifli kompozitlerde, PP lifin matristen sıyrılarak göçtüğü, matristeki çok sayıda delik (PP liflerin boşalttıkları) ve uzun lif gözlemleriyle ortaya çıkmaktadır. Diğer taraftan PVA liflerin matriste gömülü kaldığı, az miktarda sıyrılarak koptukları fotoğraflarda görülmektedir. Liflerin kopması ile çıkan sesler, lifler tarafından yapılan işin ses enerjisine dönüştüğünü göstermektedir.



(a)

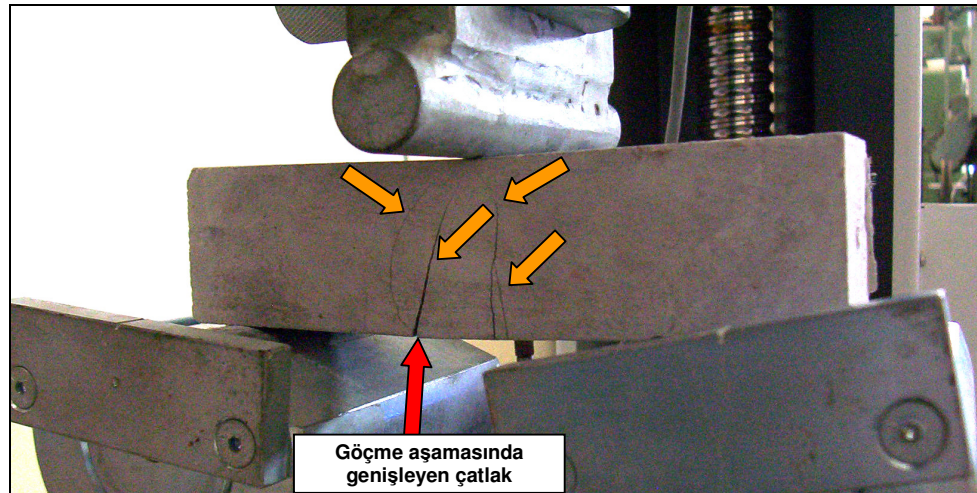


(b)

Şekil 4.44 MI matrisinde liflerin göçme mekanizmalarını açıklamaya yönelik 30, 50 ve 1000 kat büyültmeli SEM fotoğrafları; a) PP lifli, b) PVA lifli kompozitler.

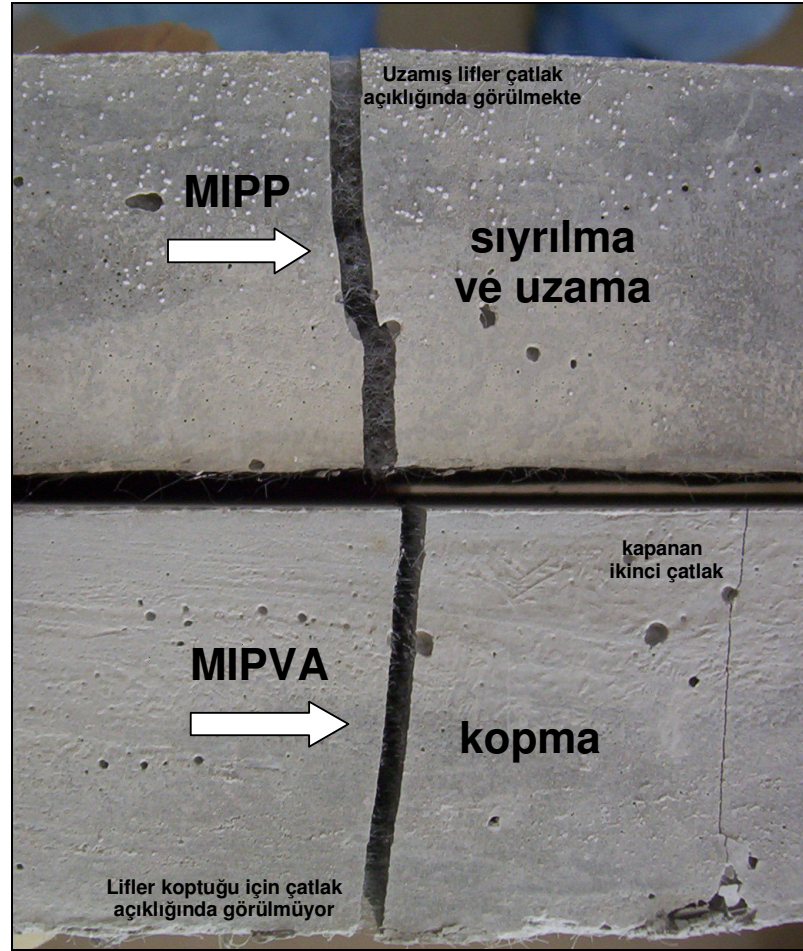
Şekil 4.40g'de ise MII matrisindeki PVA liflerin performansı sunulmuştur. Bu matrisin göreceli olarak daha zayıf olmasına rağmen, ilk çatlak oluşumunda lifler ani yük düşüşüne izin vermemiştir. Uçucu kül katkısının 56 günde lif-matris aderansına

olumlu etkisi olduğu söylenebilir. Bu yüzden ilk çatlak yükü, yük-sehim grafiğinin başlangıç bölgesindeki eğim değişiminin olduğu nokta ile belirlenmiştir. MI matrisine benzer şekilde, ilk çatlağın yarattığı eğim değişimi esnasında, örnek yüzeyinde çatlak gözlemlemek mümkün olmamıştır. Çünkü bu anda lifler köprülenme görevini yerine getirmekte ve çatlağın açılmasına izin vermemektedir. Çatlak belli bir sehim değerinden sonra gözle görünür hale gelmiştir. MII-PVA serisi örneklerden üçüncüsü çoklu çatlak davranışı göstermiştir. Kompozitte meydana gelen dört çatlak Şekil 4.45’de verilmiştir. Göçme aşamasında çatlaklardan biri genişlerken diğerleri kapanmaktadır. Öte yandan PP lif içeren yüksek dayanımlı bir matriste ise oluşan ilk çatlak, zayıf lifler tarafından hemen tutulamamakta, ani bir yük düşüşü ve sehim artışı yaşanarak, çatlak hemen görünür hale gelmektedir.



Şekil 4.45 PVA lifli MII matrisi ile hazırlanan kompozitlerden üçüncüsünde gözlenen çoklu çatlak davranışı.

Yapılan incelemeler sonucu gerek PP liflerin, gerekse PVA liflerin göçme mekanizmaları net bir şekilde ortaya konulmuştur. Yüklemenin 3 mm sehime kadar yapılmasından sonra örneklerin fotoğrafları incelenerek, PP liflerin sıyrıldığı, PVA liflerin ise koptuğu görülmüştür. Bu bulguya dayanarak göçme mekanizmaları açıklanmıştır (Şekil 4.46).



Şekil 4.46 Polipropilen ve PVA liflerin göçme mekanizmaları.

4.4.3 Kompozitlere Ön Yükleme Uygulamanın Yük-Sehim Grafiklerine Etkisi

Bu bölümde mikro betonların bir aylık iken üç kez 1000 N'luk bir kuvvetle ortadan yüklenmesi ile performanslarının nasıl değiştiği incelenmiştir. İncelenen örneklerin farklı eğilme dayanımlarına sahip olmaları nedeniyle, uygulanan ön-yükleme seviyesi de örnekten örneğe farklılık göstermektedir. Ön yüklemenin 2 aylık örneklerin ilk çatlak yükü ve maksimum eğilme yükünün % kaçısı olduğu hesaplanıp Tablo 4.11'de sunulmuştur. Ancak yüklemenin örnekler 1 aylıkken yapılmış olması, 1 aylıkken mevcut olan oranın daha yüksek olacağı sonucunu çıkarmaktadır. Bazı örneklerde, yapılan ön yüklem ilk çatlak yükünü aşmaktadır. Bu örneklerin ön yüklemde çatlamasına rağmen, lifli oldukları için yeniden yüklemde yük taşıyabildikleri düşünülmektedir. Ayrıca eğilme dayanımına yakın bir ön yüklemeye

maruz kalmış örneklerin, içyapılarında önemli derecede hasar meydana geldiği düşünülmektedir. Bazı ön yüklemeli örneklerin iki aylık dayanımlarının da sözü edilen nedenle düşük bulunduğu söylenebilir.

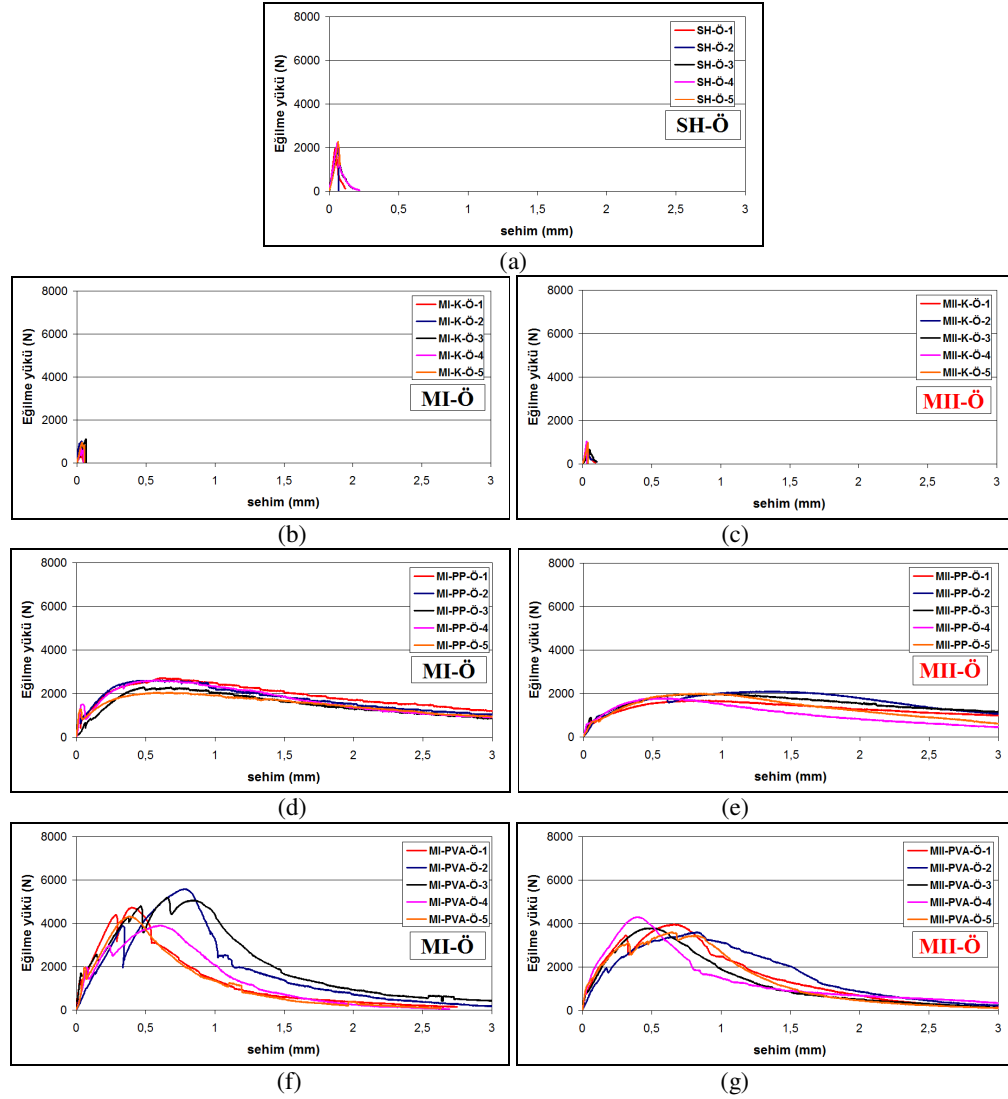
Tablo 4.11 Suda 2 ay bekleme sonrası eğilme deneyi yapılan seriler.

Ön yüklemesiz örneklerin 2 aylık değerleri	İlk çatlak yükü (N)	Maksimum eğilme yükü (N)	Ön yükleme yükü /İlk çatlak yükü (%)	Ön yükleme yükü /Maksimum eğilme yükü (%)
SH	2520	2520	40	40
MI-K	2900	2900	34	34
MI-PP	1980	2240	51	45
MI-PVA	2090	4590	47	22
MII-K	1490	1490	67	67
MII-PP*	790	1960	126	51
MII-PVA	1130	3990	88	25

* 56 günlük ilk çatlak yükü 1000 N'dan düşük olan örnekler. Bu örneklerde ön yükleme sırasında hasar meydana gelmiş olabilir.

** İlk çatlak yükünün yaklaşık %40'ına kadar olan bölge elastik bölge olarak kabul edilirse, uygulanan ön yükleme; MI-PP, MI-PVA ve tüm MII matrisli karışımlar için elastik bölgeyi geçmiştir.

Ön yükleme yapılmış örneklerden elde edilen yük-sehim grafikleri Şekil 4.47'de toplu olarak verilmiştir. Lif içermeyen örneklerden SH ve MIK, ön yükleme seviyesi %40 dolaylarında olmasına rağmen ön yüklemeden olumsuz etkilenmiştir (Şekil 4.47a, 4.47b). MIIK örnekleri ise ön yükleme seviyesi dayanımının %67'si olduğu için bu yüklemeden daha olumsuz etkilenmiştir (Şekil 4.47c). Diğer taraftan lifli matrislerin performansları incelendiğinde, ön yüklemeden meydana gelen dayanım kayıplarının düşük seviyelerde olduğu, ancak ilk çatlak dayanımlarının bir miktar azaldığı görülmüştür (Şekil 4.47d, e, f ve g). Ön yüklemeli örneklerde, PP lifli ve uçucu kül içeren matrislerin çoklu çatlak yaratma potansiyelinin arttığı da gözlenmiştir. Bu örneklerin bünyelerinde, ön yükleme nedeniyle kılcal çatlaklar oluşmuş olabileceği düşünülmektedir. Ön yüklemenin yarattığı hasarı, uçucu kül içeren PP lifli matrisler önemli derecede azaltmıştır.

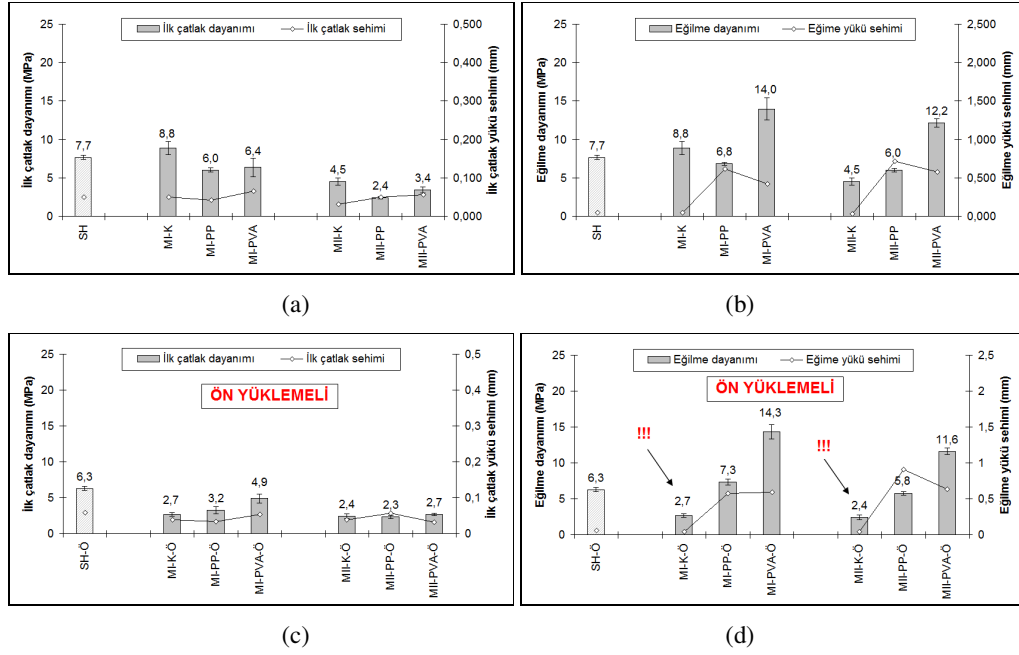


Şekil 4.47 Ön yükleme uygulanmış standart harç (a), lifsiz mikro betonlar (b,c), PP lifli MB (d,e) ve PVA lifli MB (f,g) örneklerin yük-sehim grafikleri.

4.4.4 Ön Yükleme Uygulanmış ve Uygulanmamış Mikro Betonların Mekanik Performansının Karşılaştırılması

Ön yükleme uygulanmış ve uygulanmamış mikro betonların eğilme etkisi altında mekanik özellikleri Şekil 4.48-4.50’de sütun ve noktasal grafiklerle verilmiştir. Grafiklerin hazırlanmasında, her seriden birbirine en yakın 5 deney sonucunun ortalaması kullanılmıştır. Ayrıca dayanım ve tokluk değerlerinin standart sapmasının

yarısı kadar yukarı, yarısı kadar da aşağı yönde harç çubukları da sütun grafiklere işlenmiştir.

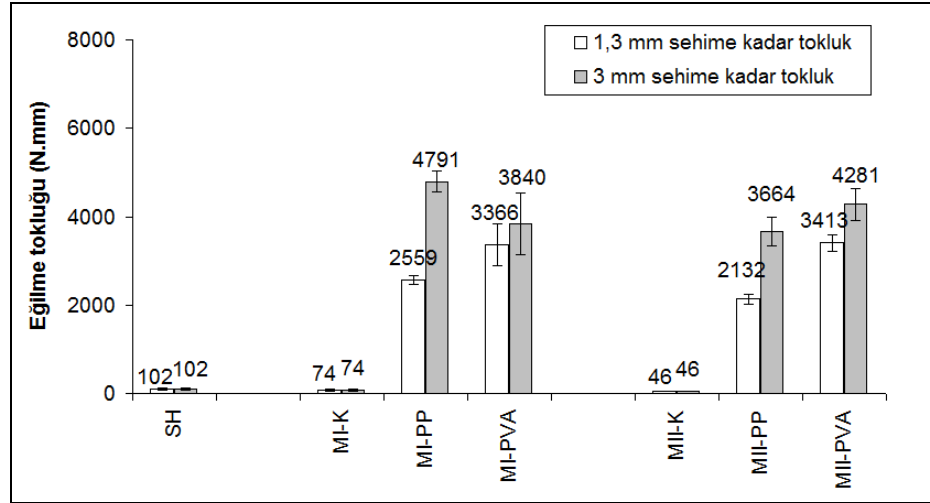


Şekil 4.48 Ön yüklemesiz ve ön yüklemeli örneklerin ilk çatlak dayanımı ve ilk çatlak sehimleri (a, c) ile, eğilme dayanımı, maksimum eğilme yükü sehimleri (b, d).

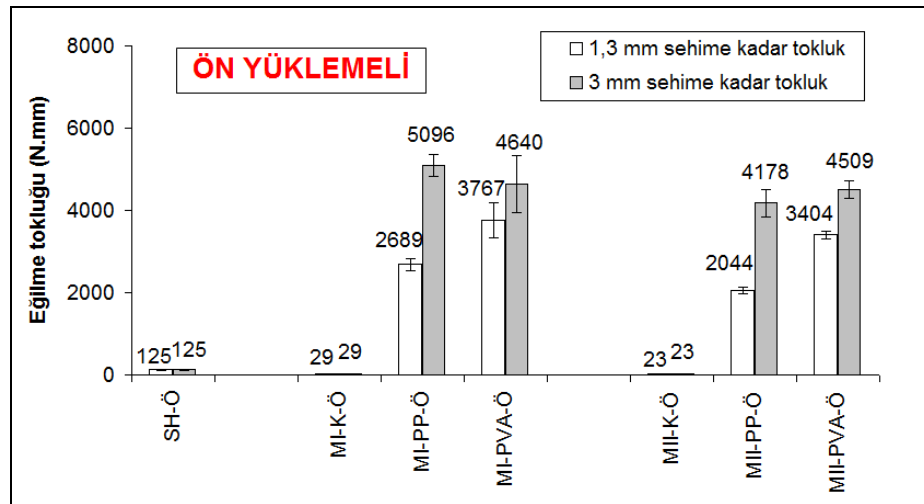
Ön yükleme uygulanmış ve uygulanmamış mikro betonların ilk çatlak dayanımları ve ilk çatlak sehimleri Şekil 4.48a ve 4.48c’de toplu olarak verilmiştir. Sütun grafikler ilk çatlak dayanımlarını, noktalar ise bu dayanım değerindeki sehim miktarlarını göstermektedir. İlk çatlak dayanımları MI matrisinde MII matrisine göre daha yüksektir. Beklenen bir sonuç olan bu durum, MI matrisinin yüksek dayanımına ve rijitliğine bağlanabilir. Liflerin ilk çatlak yüküne etkisi belirgin değildir. İlk çatlak yükü göreceli olarak daha düşük olan MII matrisinde, MI matrisine benzer şekilde ilk çatlak dayanımı, lifli matrislerde de çok farklı değildir. İlk çatlakın görüldüğü sehim değerleri incelendiğinde, her iki matris için de lif ilavesi ile ilk çatlak sehiminin arttığı görülmektedir. Şekil 4.48c’den, ön yüklemenin ilk çatlak dayanımına etkisi incelendiğinde, ön yükleme ile ilk çatlak dayanımlarının düştüğü görülmektedir. Düşüş şiddeti lifli ve lifsiz matrislerde benzer mertebelerdedir. İlk çatlak sehiminde ise önemli bir farklılık belirlenmemiştir.

Şekil 4.48b ve 4.48d’de verilen eğilme dayanımı ve maksimum eğilme yükü sehim değeri incelendiğinde, lifli mikro betonların üstün performansları açıkça görülmektedir. Eğilme dayanımı değerleri özellikle PVA lifli MB’lerde lifsiz kontrollerine göre 2-3 misli artmıştır. PP lifli matrislerde bu artış daha düşük mertebelerdedir (Şekil 4.48b). Diğer taraftan maksimum yükteki sehim değerleri de lifsiz örneklerden 20 ile 100 misli arası daha fazladır. PP lifli matrislerde de sözü edilen sehim değerleri çok yüksek mertebelerdedir. Ancak bu örneklerde çoğunlukla tek çatlak oluşumu ve o çatlakın açılması şeklinde göçme olduğundan yüksek sehim kapasitesi aslında gerçek performanslarını yansıtmamaktadır. Ön yükleme yapılması durumunda eğilme dayanımı ve maksimum eğilme yükü sehim değerlerinin değişimi Şekil 4.48d’de görülmektedir. Lifsiz mikro betonların eğilme dayanımları ön yüklemekten çok kötü etkilenirken, lif ilavesi bu olumsuz etkiyi hemen hemen tamamıyla ortadan kaldırmıştır.

Ön yüklemesiz ve ön yüklemeli örneklerin tokluk değerleri iki farklı sehim değeri ($L/100 = 1,3 \text{ mm}$ ve $L/45 = \sim 3 \text{ mm}$) için ayrı ayrı hesaplanmıştır (Şekil 4.49, 4.50). Buradaki amaç liflerin tokluğu artırma mekanizmalarının, tokluk ölçümünde kullanılan sehim sınırı ile nasıl değiştiğini göstermektir. Hem ön yüklemeli hem de ön yüklemesiz durumda, liflerin mikro betonların tokluk özelliklerinde yarattıkları önemli performans artışı, grafiklerden net bir şekilde görülmektedir. Tokluk hesabı için $1,3 \text{ mm}$ ve 3 mm sehimleri kullanıldığında, PP lifli kompozitler için bulunan değerler birbirinden oldukça farklı iken, PVA lifli kompozitlerde bu fark daha azdır. Bunun nedeni PP liflerin sıyrılma ve uzama mekanizması ile kompozitin sehim yapmasına izin vererek uzun bir süre yük taşımasını sağlamasıdır. Diğer taraftan PVA lifler koparak göçtüğünden yük seviyesi yükselmekte, ancak belirli bir sehimden sonra kompozitin yük taşıma kapasitesi hızla azalmaktadır. Bu yüzden PVA lifli kompozitlerin çoğunda $1,3 \text{ mm}$ ’den daha yüksek sehimde yük-sehim grafiği altında fazla bir alan kalmamaktadır. Ancak çoklu çatlak oluşumu ile yüksek sehim değerlerinde yük taşımaya devam eden kompozitin 3 mm sehim için tokluk değeri de artmaktadır.



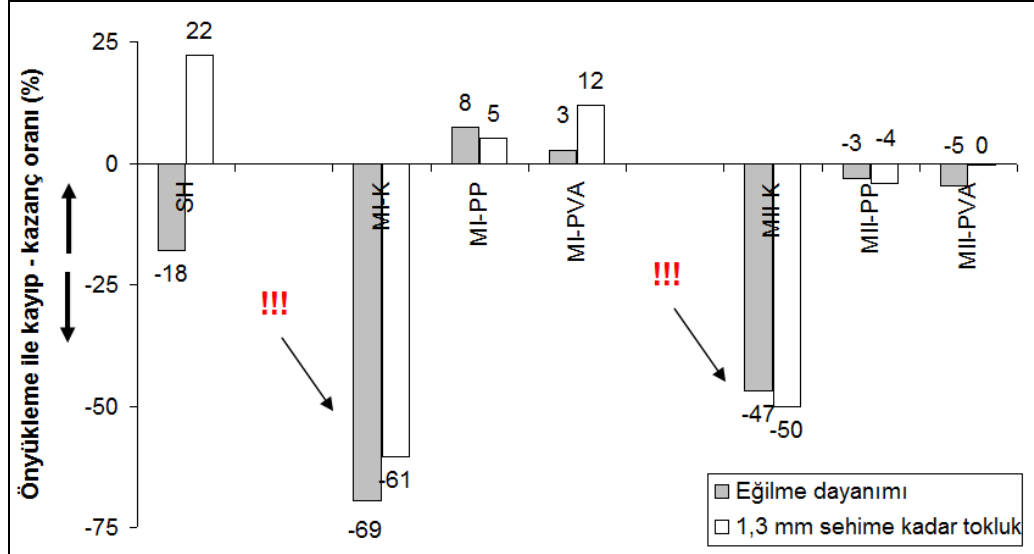
Şekil 4.49 Ön yüklemesiz örneklerin 1,3 ve 3 mm sehime kadar olan yük-sehim eğrileri altında kalan alanlar.



Şekil 4.50 Ön yüklemeli örneklerin 1,3 ve 3 mm sehime kadar olan yük-sehim eğrileri altında kalan alanlar.

Matrislerin ön yükleme nedeniyle kaybettikleri eğilme dayanımı ve tokluk oranları toplu halde Şekil 4.51’de sunulmuştur. Lif içermeyen MI ve MII matrisleri ön yükleme nedeniyle eğilme dayanımlarını ve tokluklarını MII matrisi için yarı yarıya, MI matrisi için ise yarıdan fazla kaybetmiştir. Standart harçta %18 oranında eğilme dayanımı kaybı tespit edilmiştir. Öte yandan PP ve PVA içeren matrislerde ise zaman zaman ön yükleme tokluk ve eğilme dayanımı artışına yol açmıştır. Ancak genel olarak $\pm\%10$ ’dan fazla bir etki söz konusu değildir. Bu oranlarda bir etki,

örnek değişkenliğinden bile kaynaklanmış olabileceğinden, lifli matrislerde ön yüklemenin önemli bir performans kaybına yol açmadığı söylenebilir. Elde edilen bu sonuç, lif katkısının mikro betonun herhangi bir ön yüklemeye karşı direnci arttırdığını göstermektedir.



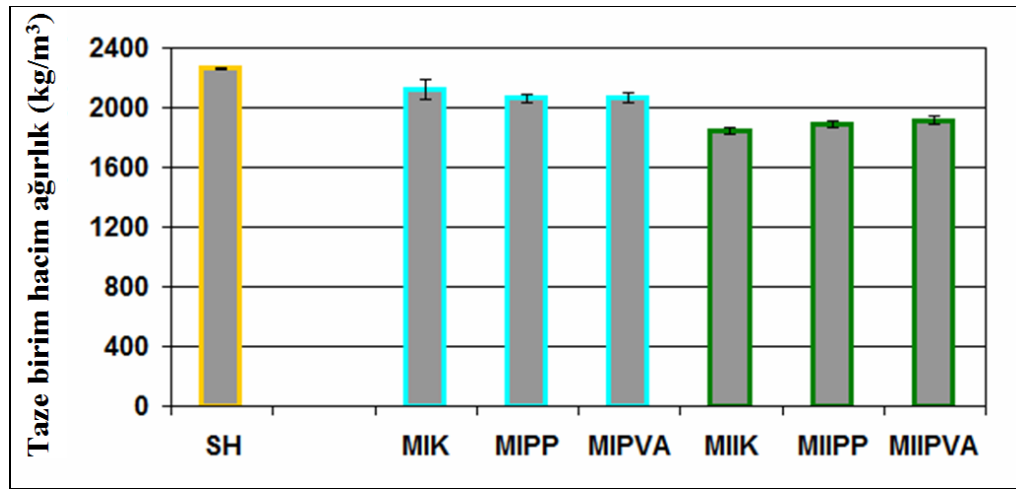
Şekil 4.51 Matrislerin ön yükleme nedeniyle eğilme dayanımı ve tokluk değerlerinde meydana gelen kayıp-kazanç oranları.

Lifsiz mikro betonların eğilme dayanımlarının ön yüklemeden çok kötü etkilenmesi ve lif ilavesinin bu olumsuz etkiyi hemen hemen tamamıyla ortadan kaldırması, yüksek tiksotropinin lifsiz matrisleri olumsuz etkilediğini ispatlamaktadır. Tiksotropi derecesi yüksek ve kendiliğinden yerleşen bir karışım, kalıba yerleştirilirken eğer döküme ara verilirse, eski dökülen tabaka ile kaynaşmasında sorunlar yaşanabilir. Bu durum mikro beton gibi tane boyutu küçük karışımlarda olduğu gibi, tiksotropi derecesi yüksek kendiliğinden yerleşen betonlarda da ortaya çıkabilir (Roussel ve diğer., 2004, Roussel ve Cussigh, 2008). Tane boyutu küçültülmüş ve kendiliğinden yerleşen kıvamlı karışımlarda lif ilavesi ve uygun akışkanlaştırıcı katkı dozajı kullanımı ile tiksotropi kaynaklı kaynaşma probleminin önüne geçmek mümkün olmaktadır.

4.4.5 Mikro Beton Karışımlarının Diğer Özelliklerinin İncelenmesi

Mikro betonların performansını etkileyen diğer fiziksel ve mekanik özelliklerden; birim hacim ağırlık, kılcal su emme ve basınç dayanımı bu aşamada hazırlanan örnekler kullanılarak incelenmiştir.

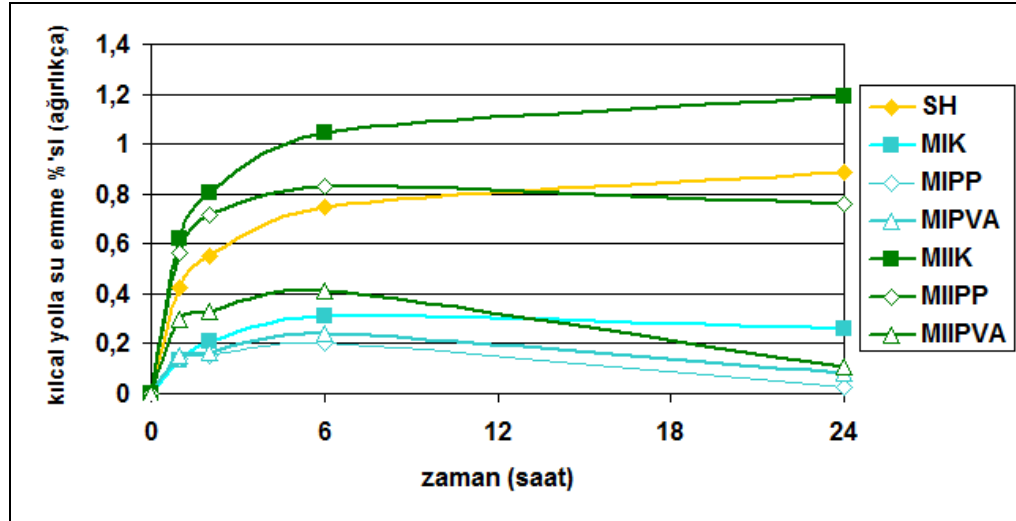
Eğilme deneyi için hazırlanan 40*40*160 mm ayrıtlı prizmatik örneklerin kalıp içinde ağırlıkları tartılarak taze birim hacim ağırlık değerleri elde edilmiştir. Deney sonuçları Şekil 4.52’de toplu olarak görülmektedir. Mikro betonların birim hacim ağırlıkları, standart harç örneklere kıyasla metreküpte 100-200 kg daha düşüktür.



Şekil 4.52 Mikro beton tasarımlarının taze birim hacim ağırlık değerleri.

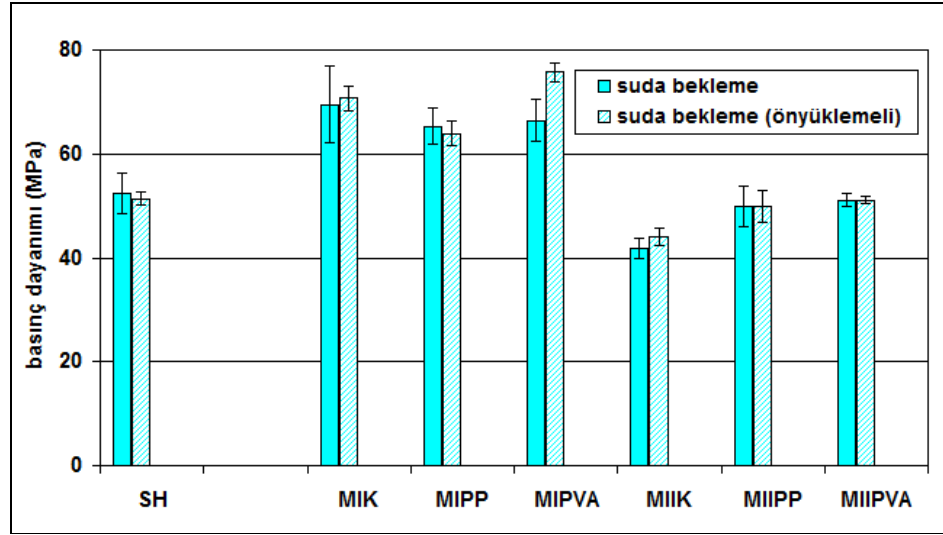
Örneklerin kılcal su emme değerlerinin tespiti için 40*40*160 mm ayrıtlı prizmatik örnekler kullanılmıştır. Deney öncesinde etüvde 105°C’de kurutulan örneklerin 40*40 mm’lik tabanlarından suya değdirilerek 1, 2, 6 ve 24 saatlik su emme ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen bulgular Şekil 4.53’de sunulmuştur. Özellikle PVA lifli matrislerde kılcal su emme değerleri oldukça düşük mertebelerde kalmıştır. Bazı örneklerde kılcal su emme değerlerinde belli bir süreden sonra azalma ölçülmüştür. Bunun nedeni, sözü edilen örneklerde zaten az olan kılcal yolla emilen suyun, buharlaşma nedeniyle örnek yüzeyinden ayrılması olabilir. Bu durum PVA lifli örneklerde daha belirgindir. PVA liflerin, örneklerde kılcal çatlakların açılmasını ve ilerlemesini engelleyici rol üstlenmeleri, kılcal yolla emilen su miktarını kısıtlamış

olabilir. Söz konusu etki, kompozitin dayanıklılık özelliklerinin de iyi olabileceği ipucunu vermektedir. Benzer sonuçların literatürde de rapor edildiği belirlenmiştir (Li, 2003a, Li ve diğer., 2004).



Şekil 4.53 Mikro beton tasarımlarının kılcal su emme değerleri.

Mikro betonların basınç dayanımı sınıflarının belirlenmesine yönelik olarak, eğilme deneyi sonrasında çıkan parçalar kullanılmıştır (ASTM C348-C349). Şekil 4.54'de incelenen karışımların basınç dayanımları toplu olarak verilmiştir. Standart harcın 2 aylık basınç dayanımı 50 MPa'ın biraz üzerindedir. MI matrisi ile hazırlanan lifsiz mikro betonların basınç dayanımı ise 70 MPa olup, lif ilavesi ile basınç dayanımında önemli bir farklılık meydana gelmemiştir. MII matrisi ile hazırlanan karışımın basınç dayanımı ise, %50 uçucu kül ikamesi ve S/B oranının MI matrisinden daha yüksek olması nedenleriyle 42 MPa'dır. Lif ilavesi MII matrisi ile hazırlanan kompozitlerin basınç dayanımlarını 50 MPa seviyelerine yükseltmiştir. Beklenileceği üzere eğilme modunda yapılan ön yüklemenin, örneklerin basınç dayanımına belirgin bir etkisi görülmemektedir. Basınç dayanımları dikkate alındığında MI matrisi güçlü, MII matrisi ise göreceli olarak zayıf matris olarak adlandırılabilir. Ancak buradaki zayıf kavramı karşılaştırma amaçlı kullanılmış olup, düşük dayanım anlamına gelmemektedir.



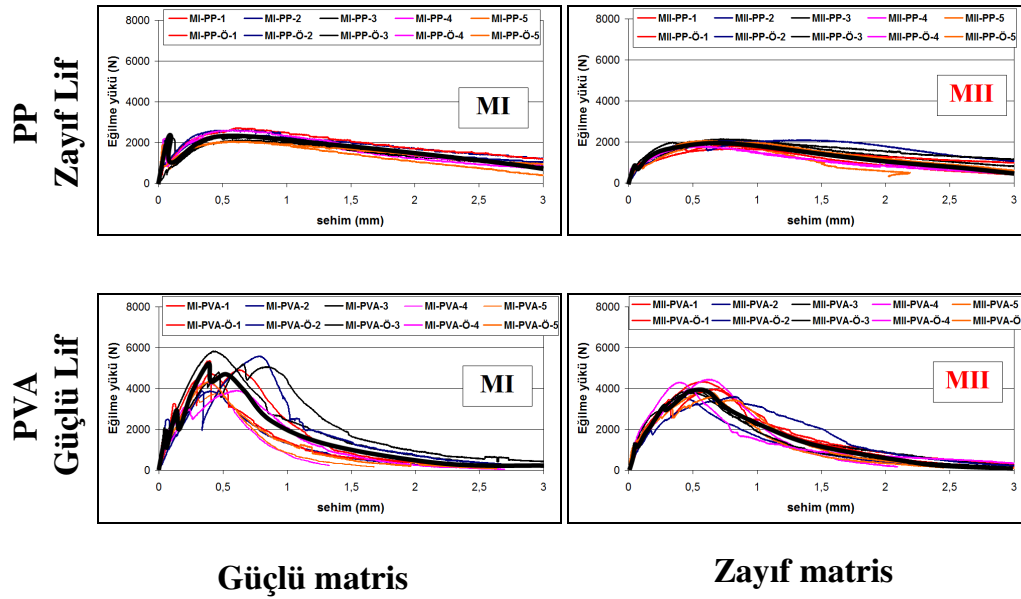
Şekil 4.54 Mikro beton tasarımlarının basınç dayanımları.

4.4.6 Yük-Sehim Eğrisi Karakterizasyonu Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar (II. Aşama)

Mikro beton üretiminde kullanılan iki farklı lif tipinin, iki farklı matristeki performanslarının ayrıntılı şekilde incelendiği bu aşamada elde edilen sonuçlar, aşağıda sıralanmıştır:

- Mikro betonda lif kullanımının, kompozitin tokluğu açısından vazgeçilmez bir ön şart olduğu tekrar ispatlanmıştır. Özellikle tiksotropi kaynaklı kaynaşmama problemleri lif katkısı ile büyük ölçüde engellenebilmektedir. Lifsiz mikro betonlar servis ömürleri öncesinde erken yaşlarda meydana gelebilecek ön yüklemelerden, lifli mikro betonlara kıyasla çok daha kötü etkilenmektedir.

- Mekanik özellikleri dikkate alındığında PP lifi, PVA lifine kıyasla göreceli olarak zayıf lif olarak kabul edilebilir. Aynı yaklaşımla MI matrisi, MII matrisine göre daha güçlüdür. Güçlü – zayıf lif ve matris kombinasyonlarından elde edilen yük-sehim grafikleri bir araya getirildiğinde mikro beton kompozitlerin performansını Şekil 4.55’deki gibi karakterize etmek mümkündür.



Şekil 4.55 Lif ve matrisin güçlü veya zayıf olması kombinasyonlarında MB kompozitlerin yük-sehim eğrileri.

PVA lifleri maksimum eğilme yüküne ulaştıktan sonra, lif köprülemesi yoluyla matrise yük aktarmakta ve ilave çatlakların oluşmasını sağlamaktadır. Böylece PVA lifi kullanımı en yüksek yüke kadar olan bölgede tokluk potansiyelini olumlu yönde geliştirmektedir. Ancak lif-matris aderansının aşırı yüksek olması, daha yüksek sehim değerlerinde liflerin kopmasına yol açtığı için yük taşıma kapasitesi kuyruk bölgesinde düşmektedir. PP lifi ile hazırlanan MI matrisinde ise, lifler ilk çatlak açıldıktan sonraki anda yükü tutamamaktadır. PP lifler yükü köprülerken aynı zamanda sıyrıldıkları için, ilave çatlakların açılması olasılığı bu kompozitlerde daha düşüktür. PP liflerin uçucu küllü MII matrisinde kullanıldığı serilerde ise, çoklu çatlak oluşma olasılığı artmaktadır. Uçucu küllü matrisin PP lif yüzeyi ile aderansı artırıcı etkisi, PP lifli matrislerde çoklu çatlak potansiyelini arttırmaktadır.

- Çoklu çatlak potansiyeli açısından PVA lifli kompozitler, PP liflilere kıyasla daha avantajlı bulunmuştur. Ancak yükleme şeklinin kesit ortasında maksimum eğilme etkisini yaratması ve aynı zamanda kesme kuvvetinin bu kesit üzerinde işaret değiştirmesi, çoklu çatlak davranışının her serinin her örneğinde gözlenememesine neden olmaktadır. Çoklu çatlak davranışını etkileyen kusurlu nokta dağılımının da

her örnekte değişkenlik göstermesi, çoklu çatlağın bazı örneklerde görülmemesinin ikinci nedenidir.

- Mikro betonların birim hacim ağırlıkları, standart harç örneklerle kıyasla metreküpte 100-200 kg daha düşüktür. Bu hafiflik, yapı performansı açısından avantaj sağlayabilir.

- Özellikle PVA lifli matrislerde kılcal su emme değerleri oldukça düşük mertebelerde kalmıştır. PVA liflerin örneklerde kılcal çatlakların açılmasını ve ilerlemesini engelleyici rol üstlenmeleri, lifli kompozitin dayanıklılık özelliklerini de olumlu etkileyebilir.

- Liflerin, mikro betonların basınç dayanımına etkisi, kullanılan matris türüne göre değişkenlik göstermektedir. MI matrisinde lif kullanımı ile basınç dayanımında önemli bir değişiklik olmazken, uçucu küllü MII matrisinde lif kullanımı basınç dayanımından %15-20 oranında artış meydana getirmektedir.

4.5 Mikro Beton Kompozitlerin Tokluk Performansını Arttırmaya Yönelik Olarak Lif Yüzeyinin Soğuk Plazma Yöntemi ile Modifikasyonu (III. Aşama)

Mikro betonun tokluk performansında matris ve lif özelliklerinin etkileri ilk iki aşamada incelenmiştir. Bu aşamada ise lif-matris ara yüzeyinin modifikasyonuna yönelik olarak, polimer liflerin yüzey yapıları plazma yöntemi ile değiştirilecektir. Modifiye edilmiş lifler kullanılarak hazırlanan kompozitlerin yük-sehim grafiklerinde meydana gelen değişiklikler araştırılacaktır. Ancak öncelikle polimer yüzeylerinin modifikasyonunda kullanılan plazma yöntemi kısaca tanıtılacak, ardından deneysel çalışmalara geçilecektir.

4.5.1 Polimer Yüzeylerin Plazma ile Modifikasyonu

Plazma terimi ilk olarak 20. yüzyılın başlarında Irving Langmuir (1926) tarafından kullanılmaya başlanmıştır. Plazma, bünyesinde elektrik yüklü veya

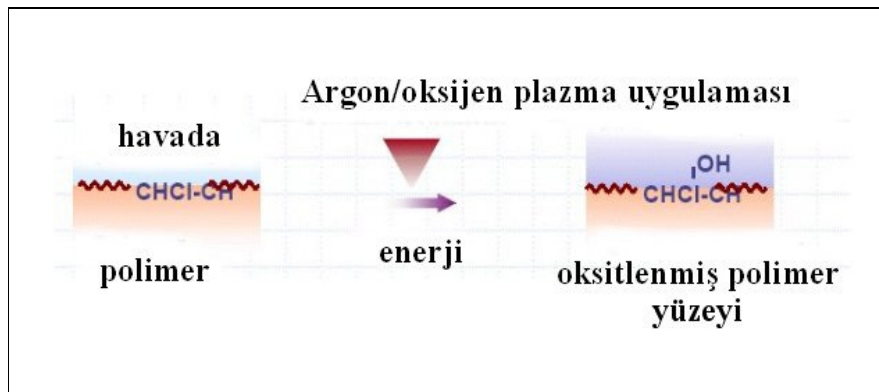
iyonize formda önemli miktarda atom ve/veya molekül bulunduran, belli oranda iyonize olmuş bir madde durumu olarak tanımlanabilir. Evrenin %99'u plazmadan oluşmakta, plazma sistemlerinin iyonizasyon dereceleri farklılık göstermektedir. İyonları, serbest elektronları, fotonları ve nötr atomları bünyesinde barındıran plazmalar, uygun koşullar altında pek çok malzeme ile reaksiyona girme eğilimindedirler. Makro açıdan yüksüz (nötr) olan plazma, bünyesinde serbest şarj taşıyıcılar içerdiğinden elektriksel olarak iletkenidir. Maddenin 4. hali olarak da bilinen plazma, 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren endüstride yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır (Kutlu ve Cireli, 2004). Plazma teknolojisi çok geniş kapsamlı ve interdisipliner bir araştırma konusudur. Plazmaların yapay olarak üretilibilmeleri için kararlı konumda olmaları gerekir. Kararlı konuma ulaşmaları için ise, plazmaların bir elektrik alan içinde tutulması gerekmektedir (atmosferik plazmalar hariç). Bu da ancak kapalı vakum ortamlarında mümkün olmaktadır.

Plazmalar aktive edilme yöntemlerine (enerji kaynağının tipi) ve uygulanan aktivasyon enerjilerine göre; soğuk ve termal plazma (ark plazmaları yüksek sıcaklık ve basınç) olarak iki sınıfa ayrılırlar. Çok geniş bir sıcaklık aralığını bünyesinde barındıran bu sınıflandırma, plazma teknolojisinin geniş kullanım aralığını da bir bakıma tanımlamaktadır. Plazma teknolojisi, yüzey kaplamaları (çok yüksek performanslı, atmosfer dışı ortamlarda direnç sağlayacak kadar), atık imhası, kimyasal sentez, korozyon direnci sağlama, dağlama, aşınma direncini artırma, biyouyumluluk, yapıştırıcılarda aderans artırma, ıslanabilirlik özelliklerini değiştirme vb. pek çok alanda kullanılmaktadır (Tendero, Tixier, Tristant, Desmaison, Leprince, 2006, Larner ve Kaplan, 2004, Stratmann, 2003). Termal plazma teknolojisi soğuk plazmaya kıyasla daha çok endüstriyelmiştir. Özellikle makine ve metalürji sektöründe yoğun kullanım alanı bulmaktadır (Gilbertson, 2001).

Bu çalışmada soğuk plazma yöntemleri üzerinde durulacağından, diğer plazma türleri hakkında literatür bilgisi verilmeyecektir. Soğuk plazma ile polimerlerin, elastomerlerin, metal ve seramiklerin içyapı özelliklerinde bir değişiklik olmadan yüzeyel yapı özellikleri değiştirilebilmektedir. Soğuk gaz plazmaları daha çok

polimer kökenli maddelerin yüzey yapısını değiştirmekte kullanılmaktadır. Çünkü polimerler yüksek sıcaklıklarda temel mekanik özelliklerini büyük ölçüde kaybetmektedirler.

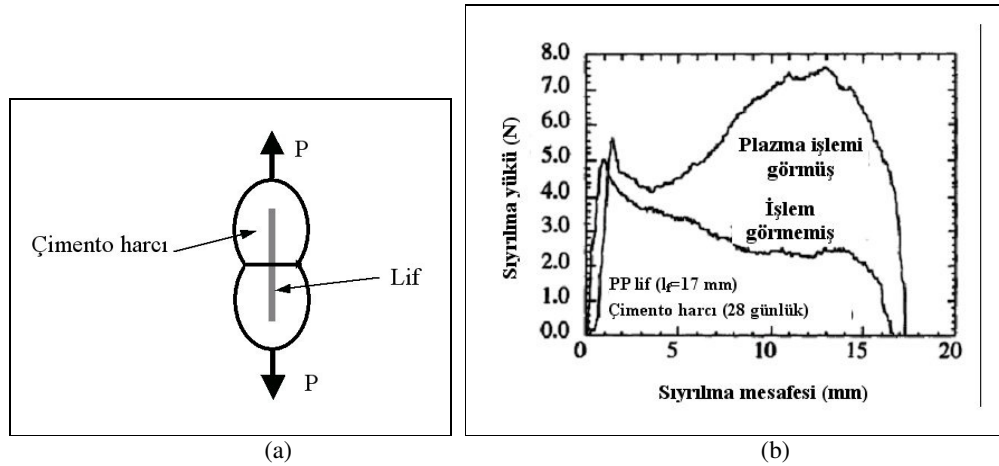
Bir malzeme belirli koşullar altında plazma ortamında tutulursa malzemeye bünyesinden çok farklı fonksiyonel yüzey özellikleri kazandırılabilir. Elde edilecek yüzey özellikleri, kullanılacak plazma tipine ve diğer bazı parametrelere göre (uygulama süresi, frekansı, basıncı, uygulanan enerji miktarı vb.) değişebilir. Polimerlerin su itici (hidrofob) yüzeyleri plazma uygulaması ile ıslanabilir hale getirilebilir (Tendero ve diğer., 2006, Kaplan, 2003). Örneğin argon ve oksijen plazması, polimer kökenli malzemelerde genellikle malzemenin yüzey enerjisini artırır ve yüzeyi hidrofil özelliğe kavuşturur. Argon ve oksijen plazması ile işlem gören PVC polimerinin yüzey enerjisi ve suyun yüzeyi ıslatma kapasitesi artmaktadır. Şekil 4.56'da görüldüğü gibi, polimer yüzeyinde plazma ile meydana gelen -OH bağları polimer yüzeyinin ıslanabilirliğini değiştirmektedir.



Şekil 4.56 PVC polimerinin argon/oksijen plazması ile yüzeyinde -OH bağlarının oluşması ve ıslanabilirliğinin artması.

Polimer kökenli lifler de soğuk plazma yöntemleri ile modifiye edilebilir. Böylece lif yüzey özelliklerinde değişimler meydana getirilerek liflerin çimento bazlı kompozitlerdeki davranışları değiştirilebilmektedir. Li ve Stang (1997) yaptıkları deneysel çalışmada polipropilen lifleri plazma ile modifiye etmiştir. Çimento bazlı matrisle lif arasındaki aderansı arttırmaya yönelik olarak, plazma yöntemini kullanmışlardır. Araştırmacılar, Şekil 4.57a'da verilen kompozitleri hazırlamıştır.

Lifin matristen sıyrılma miktarı ile sıyrılma yükü verileri kullanılarak Şekil 4.57b’de verilen grafik elde edilmiştir. Plazma uygulanan liflerin tokluk performansı önemli derecede gelişmiştir. Deformasyon artışı ile birlikte yük artışının görülmesi, polipropilene uygulanan plazmanın yüzeyde yarattığı dağlama etkisine bağlanmıştır. Yüzeydeki mikro-pürüzlenme lifin matrise aderansını arttırmış ve lifler sıyrılırken taşınan yük seviyesi artmıştır.



Şekil 4.57 a) Lifli kompozitler için hazırlanan sıyrılma testi düzeneği, b) plazma işlemi görmüş ve görmemiş polipropilen liflerle hazırlanan kompozitlerin yük - sıyrılma eğrileri (Li ve Stang, 1997).

Wu ve Li (1999), Şekil 4.57a’da prensip şeması verilen düzeneği kullanarak polietilen lifli kompozitlerdeki sıyrılma yükleri ile tokluk değerlerini, işlem görmemiş liflerle hazırlanmış kompozitle karşılaştırıp, en yüksek aderans ve tokluk değerlerinin elde edildiği plazma işleminin en uygun süresini tespit etmişlerdir. Aderans değerinde 6,3 kat (oksijen, 10 dakika, 300W), tokluk değerinde 6,9 kat (argon, 5 dakika, 300W) artış gözlenmiştir. Bu konuda belli polimer lifleri için gaz tipi ve enerji seviyesi dikkate alınarak en uygun uygulama süresini gösteren patentler de mevcuttur (Li ve Wu, 1998).

Özetle plazma tekniği kullanılarak polimer liflerin yüzey yapıları fiziksel ve kimyasal olarak değiştirilebilmektedir. Böylece ister polimer, ister çimento kökenli matris olsun; lif matris ara yüzey aderansı artırılarak matris performansı

geliştirilebilir (Kaplan 2004, Li ve Stang, 1997, Li, Ye ve Mai, 1997, Kong, Bike ve Li, 2003, Li, Horikoshi, Ogawa, Torigue ve Siato, 2004).

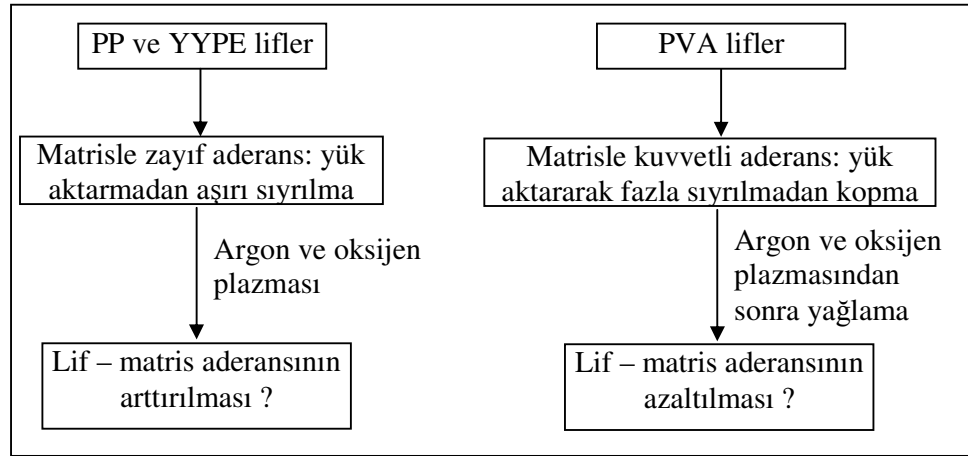
4.5.2 Plazma Modifikasyonu ile İlgili Deneysel Çalışmalar

Mikro beton matrislerin tokluk performansını arttırmaya yönelik olarak öncelikle polimer liflerin yüzeyleri modifiye edilecektir. Bu kapsamda üç farklı tipte polimer lif (PP, YYPE, PVA) kullanılacaktır. Liflerden PP ilk aşamadan beri kullanılmakta olan tek tip liftir. YYPE lifler kompozit üretiminde bu aşamada ilk defa kullanılacaktır. PVA lif olarak bu bölümde “rec15” lifi kullanılmıştır. Liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri 4.1 Bölümünde sunulmuştur.

4.5.2.1 Amaç, Kapsam ve Yöntem

İncelenen polimerlerden PP ve YYPE lifleri, hidrofob ve pürüzsüz yüzey yapısında olup, PVA ise diğer liflere kıyasla hidrofil ve pürüzlü yapıdadır. Hidrofob yüzey yapısına sahip bir lifin matrisle aderansı yetersiz ise, lif kolayca matristen sıyrılmakta ve kompozitin performansını olumsuz etkilenmektedir. Diğer taraftan hidrofil yüzey yapısına sahip olan bir lif ise, matrisle aderansının aşırı yüksek olması durumunda koparak göçmekte ve kompozitin tokluk performansına katkısı sınırlı kalmaktadır. Bu yüzden, liflerin yüzey özelliklerinin farklı olması, kompozitteki performansları artırma açısından *farklı modifikasyon stratejileri* izlenmesini gerektirmektedir. PP ve YYPE liflerde hedef lif-matris arasındaki bağı güçlendirmek iken, PVA lifler için yüksek olan lif-matris bağı bir miktar azaltarak optimize etmek hedeflenmiştir (Şekil 4.58). İlk olarak, PP ve YYPE liflerin yüzey özellikleri plazma ile hidrofob yapıdan hidrofil hale dönüştürülmüştür. Bu işlem için PP ve YYPE plakalar üzerinde, farklı güç ve uygulama süreleri için ön denemeler yapılmıştır. Denemeler sonucu her iki plazma koşulunda dört farklı güç ve uygulama süresinde işlem gören lif serilerinin incelenmesine karar verilmiştir. PVA lifler ise önce aynı plazma uygulama koşullarında modifiye edilmiş, ardından yağlanmıştır. Bu amaçla kalıp ayırıcı mineral bazlı yağ kullanılmıştır (Sika Separol S3®). Yağlama işlemi ile matrise aderansı çok yüksek olan PVA liflerin matristen

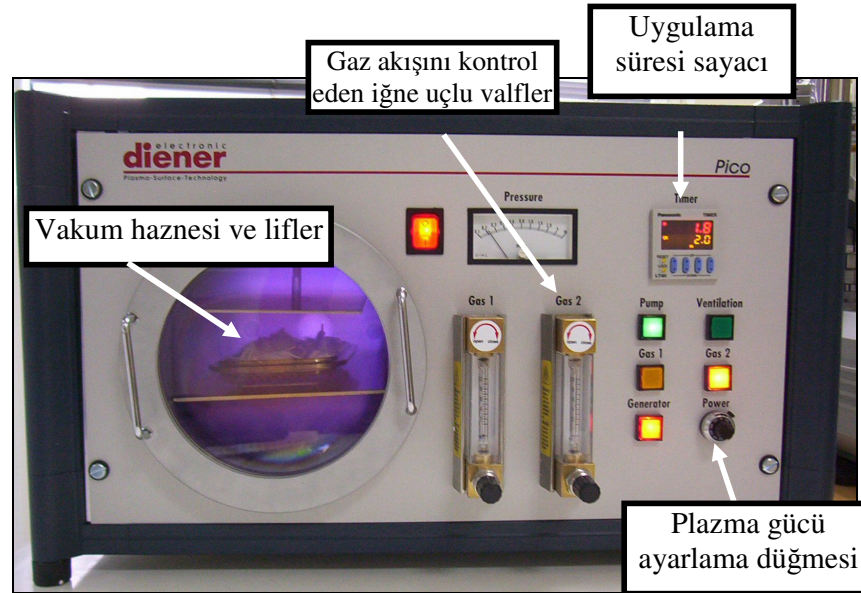
sıyırılmasını sağlamak ve tokluk performansını bu yolla geliştirmek hedeflenmiştir (Li, Wu, Wang, Ogawa ve Saito, 2002). Plazma uygulamadan yapılan yağlama işleminde yağ matrise geçmekte ve kompozitin performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Plazma sonrası yağlama ile yağ moleküllerinin lif yüzeyine bağlanma olasılığı arttırılmıştır.



Şekil 4.58 Polimer lifler için hedefe yönelik farklı plazma uygulama stratejileri.

Plazma modifikasyonu için düşük frekansta (LF: 40kHz) plazma oluşturulabilen Diener Electronic Firmasının Pico model cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz yardımıyla vakum ortamında farklı güç (0-200W) ve uygulama sürelerinde istenen gaz ve/veya monomerlerin plazmasını oluşturmak mümkündür. Sistemin temel bileşenleri Şekil 4.59’da işaretlenmiştir. Sistem bir vakum pompasına bağlıdır. Numune hücreleri vakum pompası ile 0,2 mBar’a kadar vakumlanıp, sisteme gaz akışı iğne uçlu valflerle sağlanmaktadır. Güç ayarlanarak plazmanın haznede oluşması sağlanmaktadır. Yapılan ön denemelerde polimer yüzeyler oksijen ve argon plazmaları ile 60-120 ve 180W plazma gücünde, 0,5, 1, 2, 5, 8 ve 30 dakika modifiye edilmiştir. Bu denemelerden seçilen 4 farklı güç-uygulama süresi kombinasyonu (60W - 8 dakika, 120W - 2 dakika, 180W - 2 dakika ve 180W - 30 dakika) lifler üzerinde uygulanmıştır. Tüm lifler ile MI matrisi kullanılarak 40*40*160 mm ayrıtlı prizmatik örnekler hazırlanmıştır. PP ve YYPE lifler hacimce %1 oranında kullanılırken, PVA lifler %2 oranında kullanılmıştır. Liflerin performansı birbiri ile

karşılaştırılırken bu dozaj farkı da dikkate alınmalıdır. Hazırlanan kompozitlerin adlandırılmasında kullanılan kısaltmalar Tablo 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.59 Polimerlerin yüzey modifikasyonu için kullanılan Diener Electronic Pico model cihazı (LF: 40kHz).

Tablo 4.12 Plazma modifikasyonu çalışmalarında incelenecek kompozitlerin kodları.

Plazmasız	60W 8 dakika	120W 2 dakika	180W 2 dakika	180W 30 dakika
PP00-0*	PP60-A8 PP60-O8	PP120-A2 PP120-O2	PP180-A2 PP180-O2	PP180-A2 PP180-O2
Y00-0**	Y60-A8 Y60-O8	Y120-A2 Y120-O2	Y180-A2 Y180-O2	Y180-A2 Y180-O2
PVA00-0-Y***	PVA60-A8-Y PVA60-O8-Y	PVA120-A2-Y PVA120-O2-Y	PVA180-A2-Y PVA180-O2-Y	PVA180-A2-Y PVA180-O2-Y

* PP lifler tüm örneklerde %1 oranında kullanılmıştır.

** YYPE lifler tüm örneklerde %1 oranında kullanılmış olup, Y kısaltması ile kodlanmıştır.

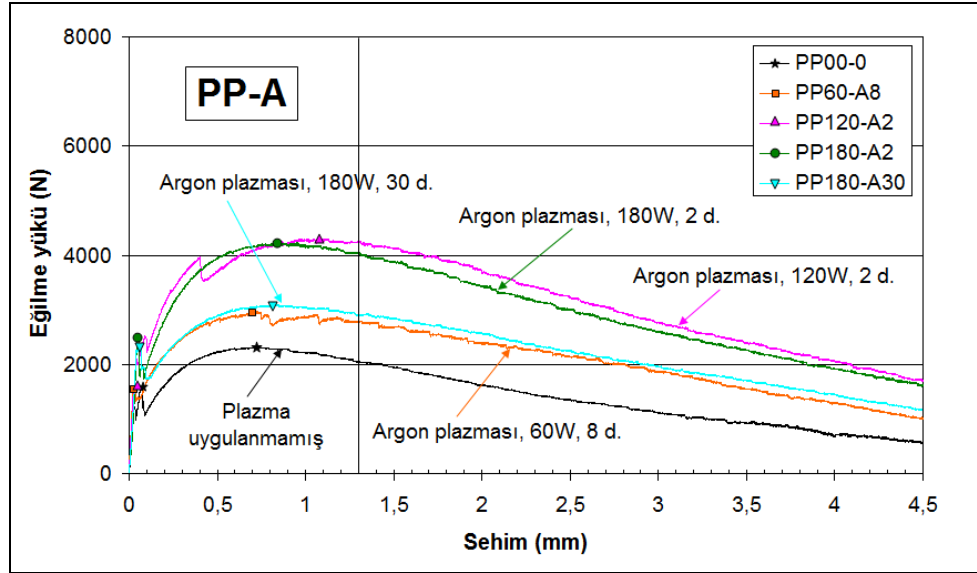
*** PVA lifler tüm örneklerde %2 oranında kullanılmıştır. Y harfi yağlanmış anlamındadır.

4.5.2.2 Polipropilen (PP) Liflerde Plazma Modifikasyonunun Kompozit Performansına Etkileri

Argon ve oksijen plazması için PP lifli kompozitlerin performansları ayrı ayrı incelenmiştir. Yük sehim grafikleri aynı karışımdan hazırlanmış üç farklı örnekten elde edilen değerlerin ortalaması kullanılarak çizilmiştir (Şekil 4.60-4.62). Ayrıca ortalama eğrinin elde edildiği örneklerin yük-sehim eğrileri EK-C’de sunulmuştur.

4.5.2.2.1 Argon Plazması Uygulanan PP Lifli Kompozitlerin Performansı.

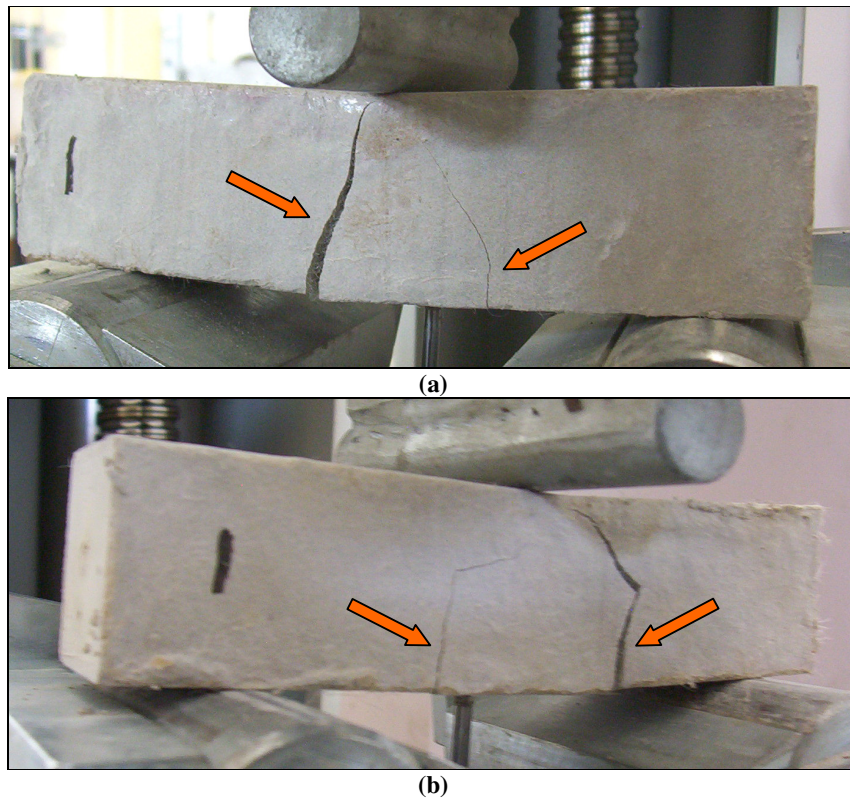
Argon plazması uygulanan lifler ve kontrol amacıyla plazma uygulanmayan lifler kullanılarak hazırlanan örneklerin, 4,5 mm sehime kadar olan yük-sehim grafikleri Şekil 4.60'da verilmiştir. Argon plazmasının, incelenen tüm güç ve uygulama sürelerinde yük-sehim eğrisini yukarı yönde ötelediği belirlenmiştir. Bu öteleme kompozitin eğilme dayanımını iki katından daha fazla arttırabilmektedir.



Şekil 4.60 Argon plazması uygulanan PP liflerle hazırlanan kompozitlerin yük-sehim grafikleri.

Argon plazmasının 60 Watt güçte 8 dakika uygulandığı lifler ile hazırlanan kompozitte ilk çatlak dayanımının düştüğü, ancak ilk çatlak sonrası oluşan yük düşüşünün plazma uygulanmamış liflerden daha düşük mertebelerde kaldığı görülmüştür (yaklaşık 100-200 N). Daha sonra çatlak düzlemindeki liflerin köprülenmesi ile yükselen yük değeri 0,8 mm orta nokta sehiminde, yaklaşık 3000 N seviyelerine ulaşmıştır. Bu seviyeden sonra yük düşüşü aşamasında plazma uygulanmamış PP liflerde görülmeyen bir davranış tespit edilmiştir. Orta nokta sehimini artarken, örnekte ani yük düşüşleri ve tekrar yükselmeleri kısa aralıklarla tekrarlanmaktadır. Bu durum PP liflerin bazılarının koparak kesitin daha üst seviyelerindeki lifleri aktif hale getirdiğinin göstergesidir. Bazı liflerin kopması ancak lif ile matris arasında bir aderans artışı olduğunda mümkün olacağından, yapılan plazma uygulamasının lif matris aderansını arttırdığı ispatlanmaktadır.

Argon plazmasının 120 W ve 180 W güçte 2 dakika uygulandığı lifler ile hazırlanan kompozitler en iyi performansı vermiştir. İlk çatlak yükü ortalama 2500 N'a kadar yükselmiş ve ilk çatlak sonrası yük düşüşleri bir önceki uygulamaya benzer şekilde düşük seviyelerde kalmıştır. Ayrıca örneklerden bazılarında genellikle PVA liflere özgü olan çoklu çatlak davranışı gözlenmiştir (Şekil 4.61). Ancak çatlak sayısı 2-3'ü geçmemiştir. Ulaşılan en yüksek yük seviyesi örnekler arasında büyük farklılık göstermekte, 3800-5000 N arasında değişmekle beraber ortalama 4200 N seviyelerindedir. Liflerin çatlak köprülenmesi sonucu taşıdıkları yük seviyesi 4,5 mm sehimde bile en az 1000 N olup, kontrol lifli örneklerinin yük seviyesinin üzerindedir. Bu farklılık lif matris aderansındaki artışın açık göstergesidir.



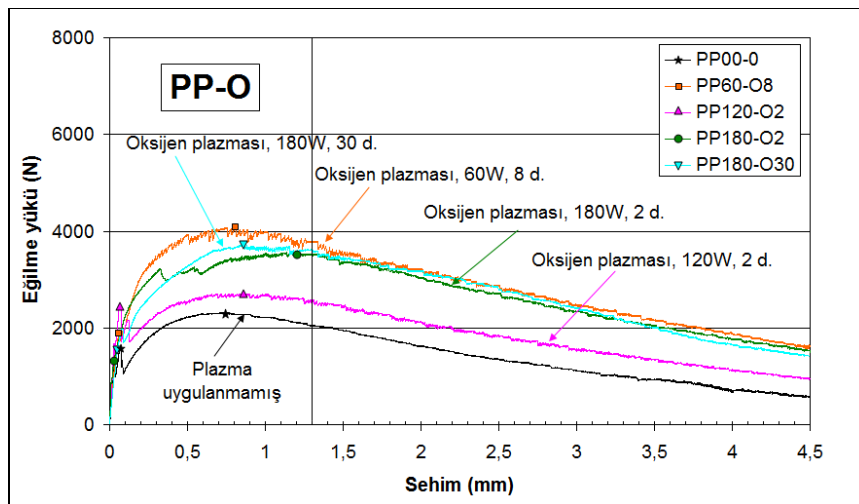
Şekil 4.61 Çoklu çatlak oluşan argon plazmalı örnekler; a) PP60-A8-1, b) PP120-A2-1

Argon plazması gücü 180 W iken uygulama süresinin aşırı artırılması, plazmanın liflerde yarattığı aderans artırıcı etkiyi daha da arttıracağına önemli derecede azaltmıştır (Şekil 4.60). Eğrinin kontrol lifli kompozite kıyasla daha yüksekte

olmasına karşın, diğer plazma koşullarına göre performans düşüşü uzun süreli plazmanın lifin mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir.

4.5.2.2.2 Oksijen Plazması Uygulanan PP Lifli Kompozitlerin Performansı.

Oksijen plazması uygulanan lifler ve kontrol amacıyla plazma uygulanmayan lifler kullanılarak hazırlanan örneklerin, 4,5 mm sehime kadar olan yük-sehim grafikleri Şekil 4.62’de verilmiştir. Argon plazmasına benzer şekilde, tüm güç ve uygulama sürelerinde oksijen plazması etkisi ile yük-sehim eğrisi yukarı yönde ötelenmektedir. Oksijen plazmasının 60 Watt güçte 8 dakika uygulandığı lifler ile hazırlanan kompozitlerin en iyi performansı verdiği söylenebilir. Plazma uygulama gücü 120 W’a çıkarılıp süre 2 dakikaya indirildiğinde ise, ilk çatlak dayanımlarının örnekten örneğe değişmekle beraber arttığı, ancak ilk çatlak sonrası yük düşüşünün oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Daha sonraki toparlanma aşamasında yük tekrar yükselerek 2500-3000 N mertebelerine ulaşmaktadır. Güç 180 Watt’a çıkarılıp yine 2 dakika oksijen plazması uygulandığında örneklerde çoklu çatlak davranışı gözlenmiştir. Ancak çatlak sayısı 2-3 adetle sınırlıdır (Şekil 4.63). İlk çatlak dayanımları düşmüş ancak en yüksek eğilme yükü değerleri 3000-4000 N seviyesine yükselmiştir. Sürenin arttırılıp 30 dakikaya çıkarılması halinde ise, ilk çatlak dayanımı bazı örnekler için yükselmekte, ancak genel davranış 2 dakikadakine benzer şekilde olmaktadır.



Şekil 4.62 Oksijen plazması uygulanan PP liflerle hazırlanan kompozitlerin yük-sehim grafikleri.



(a)



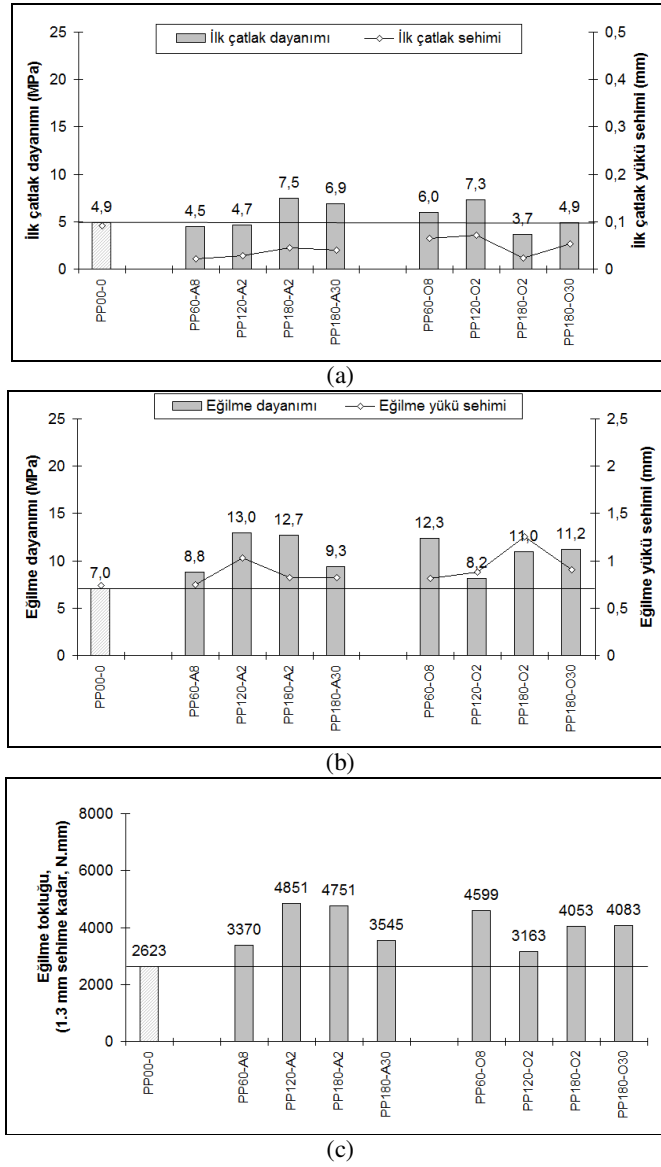
(b)

Şekil 4.63 Oksijen plazmalı lif kullanılan örneklerden çoklu çatlak oluşturanlar; a) L180-O2-1, b) L180-O2-3.

4.5.2.2.3 Argon ve Oksijen Plazması Uygulanan PP Lifli Kompozitlerin Performanslarının Birlikte Değerlendirilmesi. Argon ve Oksijen plazması uygulanan PP lifli kompozitlerin ortalama yük-sehim eğrileri üzerinden okunan ilk çatlak yükü ve eğilme yükü değerleri ile ilk çatlak dayanımı ve eğilme dayanımları hesaplanmıştır. İlk çatlak yükü sehim ve en büyük eğilme yükü sehim değerleri de grafikler üzerinden tespit edilmiştir. Ayrıca 1,3 mm sehime kadar yük-sehim eğrisi altında kalan alan eğilme tokluğu olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular Şekil 4.64'de verilmiştir.

İlk çatlak dayanımı yüksek güçlerde argon plazması uygulaması ile artarken, oksijen plazmasının düşük güçlerde uygulanması ilk çatlak dayanımını arttırmaktadır. İlk çatlak sehim ise her iki plazma türü uygulaması ile azalmaktadır (Şekil 4.64a). Eğilme dayanımı ve en yüksek eğilme yükü sehim değerleri tüm plazma koşullarında artış göstermiş olup, artış oranı %15-80 arasında değişmektedir.

Argon ve oksijen plazması için sırasıyla 120W – 2 dakika ve 60 W – 8 dakika koşullarında en yüksek eğilme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Eğilme yükü sehimleri ise plazma koşuluna göre dalgalanmaktadır (Şekil 4.64b).



Şekil 4.64 Kompozitlerin; a) ilk çatlak dayanımı / ilk çatlak sehimleri, b) eğilme dayanımı / eğilme yükü sehim, c) tokluk değerlerinin liflere uygulanan plazma ile değişimi.

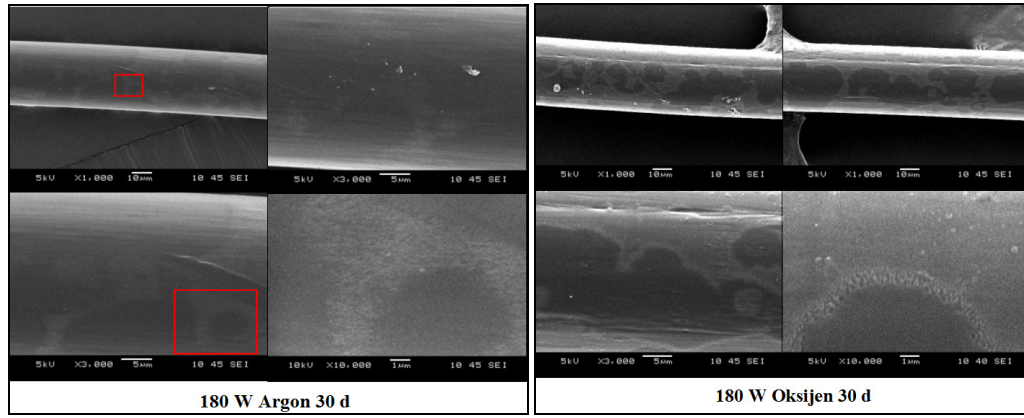
Kompozitlerin eğilme tokluklarının karşılaştırıldığı Şekil 4.64c’de, tüm plazma koşullarında kompozit tokluğunun farklı oranlarda artış gösterdiği, en yüksek tokluk

değerlerinin 120W – 2 dakika argon plazması (4851 N.mm) ve 60 W – 8 dakika oksijen plazması (4599 N.mm) koşullarında elde edildiği görülmektedir. Plazma uygulanmamış kontrol lifinin kullanıldığı kompozitlerde tokluk 2623 N.mm düzeyindedir. Söz konusu tokluk artışı, liflerin matrisle aderansının önemli derecede arttırıldığını göstermektedir. Aderans artışı ile açılan çatlak sayısının 2-3'e çıkartılması, birden çok çatlak açıklığındaki liflerin yük taşıma amacıyla devreye girmesini sağlamakta, böylece kompozitin eğilme performansı artmaktadır.

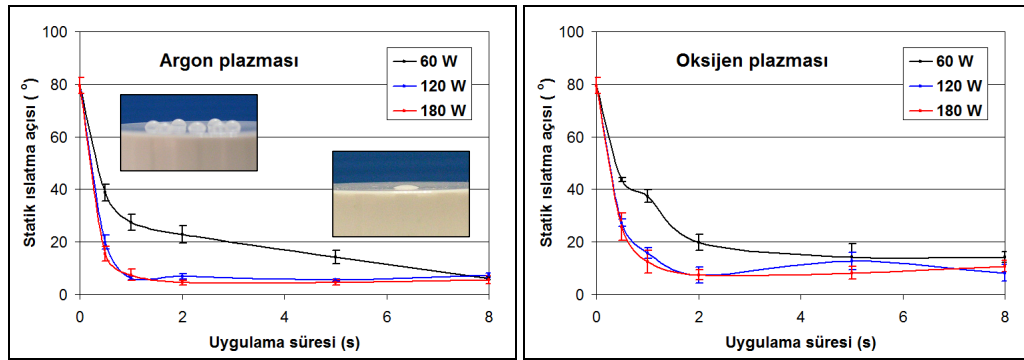
Argon ve oksijen plazmalarının etkisiyle PP liflerin matrisle aderansının artışı, yapılan mikro-yapı incelemeleri, gözlemler ve literatür incelemeleri ışığında iki farklı mekanizmaya bağlanmıştır:

1. Plazmanın fiziksel etkisi: PP liflerin yüzeylerinde plazma etkisi ile oluşan nano veya mikro boyuttaki fiziksel pürüzlenme, lif-matris aderansını olumlu etkileyebilmektedir. Ancak söz konusu pürüzlenme aşırı derecede artarsa, lifte kesit kaybına veya yük altında enine yırtılmaya neden olarak lifin kendi performansını olumsuz etkileyebilir. Taramalı elektron mikroskobu ile nano boyuttaki pürüzlenme gözlenemese de mikro-boyutta meydana gelen fiziksel değişim incelenebilir. Şekil 4.65'de bu çalışmada kullanılan PP liflerin 180 W – 30 dakika plazma sonrası taramalı elektron mikroskobu fotoğrafları görülmektedir. Özellikle yüksek güç ve aşırı uygulama süresi, her iki plazma koşulunda lif yüzeyinde SEM yardımıyla gözlenebilen lokal dağlanmaya yol açmaktadır. Bu nedenle plazma uygulamasının güç ve uygulama süresi uygun seçilmelidir.

2. Plazmanın fiziko-kimyasal etkisi: Plazma uygulaması nedeniyle PP liflerin yüzey enerjilerinin değişimi ile ıslanabilirlikleri artmıştır. Yüzeyde normalde bulunmayan –OH bağları plazma sonrasında oluşmakta ve yüzeyin daha reaktif hale gelmesi sağlanmaktadır. Şekil 4.66'da PP plakalar üzerinde yapılan ıslatma açısı ölçümlerinden, plazmanın ıslatma açısını azaltıcı etkisi görülmektedir. Liflerin yüzey ıslanabilirliğindeki bu artışın, lif-matris arasında çekim kuvveti vazifesi görmesi olasılığı yüksektir. Hidrofob bir yüzeye kıyasla geçiş bölgesinin, plazma işlemi görmüş hidrofil bir lifte daha dar olacağı düşünülmektedir. Dolayısı ile lif-matris arasındaki sürtünme yüzeyi ve sıyrılma sırasında yük taşıma kapasitesi artmaktadır.



Şekil 4.65 PP liflerin 180 W – 30 dakika plazma sonrası taramalı elektron mikroskobu fotoğrafları.



Şekil 4.66 Argon ve oksijen plazması (60, 120 ve 180 Watt) uygulanması sonucu PP plakalardan elde edilen ıslatma açısı değerleri.

4.5.2.3 Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE) Liflerde Plazma Modifikasyonunun Kompozit Performansına Etkileri

YYPE lifli kompozitlerin performansları argon ve oksijen plazması için ayrı ayrı incelenecektir. Yük sehim grafikleri üç farklı örnekten elde edilen değerlerin ortalaması kullanılarak çizilmiştir. Ayrıca ortalama eğrinin elde edildiği örneklerin yük-sehim eğrileri EK-D’de sunulmuştur.

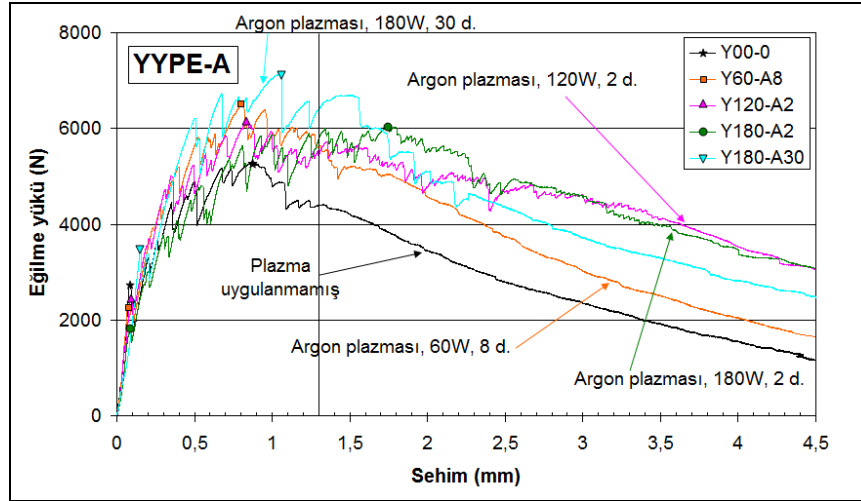
4.5.2.3.1 Argon Plazması Uygulanan YYPE Lifli Kompozitlerin Performansı.

YYPE lifler PP liflere kıyasla çok daha yüksek mekanik özelliklere sahip, yüksek performanslı liflerdir. Hiçbir plazma uygulaması yapılmadan bu liflerin MI matrisinde %1 oranında kullanılması ile hazırlanan kompozitlerin yük-sehim grafikleri performans farkını açıkça ortaya koymaktadır (Şekil 4.67 – YYPE00-0, Şekil 4.60 – PP00-0). YYPE lif katkılı kompozitte ulaşılan 5000 N’u aşan en büyük eğilme yüküne karşılık, aynı oranda PP lifi katkılı kompozitin eğilme yükü 2200 N seviyelerindedir. YYPE lifli kompozit, incelenen matris tipi ve lif dozajında, hiçbir plazma uygulaması yapılmadan bile çoklu çatlak potansiyeli göstermektedir. Ancak argon plazması uygulanan lifler ve kontrol amacıyla plazma uygulanmayan lifler kullanarak hazırlanan örneklerin, 4,5 mm sehime kadar olan yük-sehim grafikleri dikkate alındığında, YYPE liflerin mevcut potansiyelini daha üst seviyelere çıkarmanın mümkün olduğu görülmüştür (Şekil 4.67a).

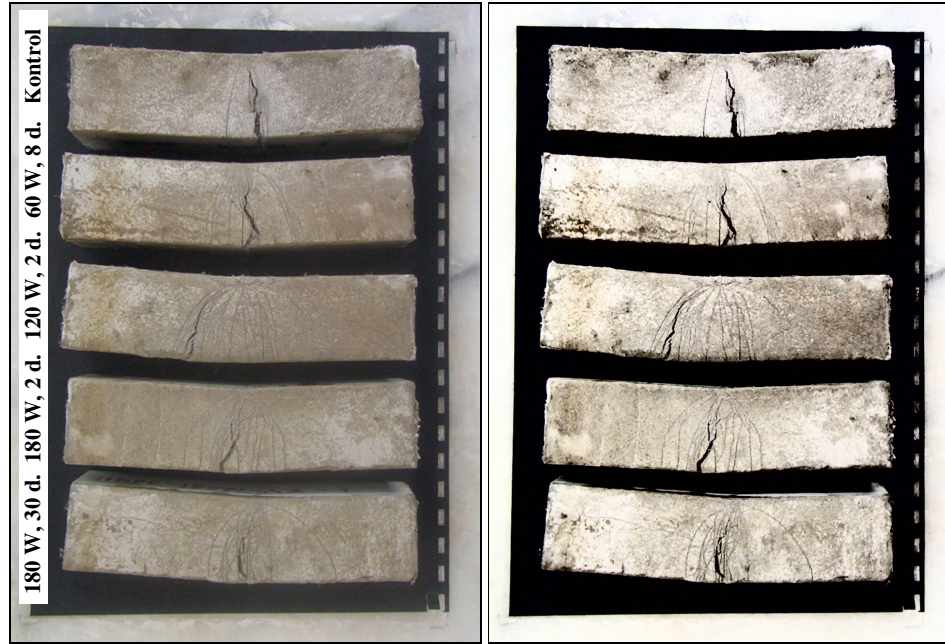
Argon plazmasının incelenen tüm güç ve uygulama sürelerinde, yük-sehim eğrisini yukarı yönde ötelediği belirlenmiştir. Bu öteleme kompozitin taşıdığı eğilme yükünde %30’a kadar artış sağlayabilmektedir. Aynı zamanda kompozitlerin çoklu çatlak davranışlarının plazma uygulaması ile geliştiği gözlenmiştir. Plazma etkisi ile ortadan tekil yükleme gibi olumsuz bir yükleme koşulunda bile çatlak sayısı artmakta ve çatlaklar örneğin geniş bir bölgesine yayılmaktadır (Şekil 4.67b). Plazma uygulanmış lifli kompozitlerin, 4,5 mm gibi yüksek sehime değerlerine ulaşmalarına rağmen, halen 3000 N’a kadar yüksek yükleri taşıyabildikleri yük-sehim grafiklerinden görülmektedir.

4.5.2.3.2 Oksijen Plazması Uygulanan YYPE Lifli Kompozitlerin Performansı.

Oksijen plazmasının 4 farklı koşulda uygulandığı liflerle hazırlanan kompozitlerin yük-sehim grafikleri Şekil 4.68a’da verilmiştir. Bu eğrilerden oksijen plazmasının çoğunlukla (en yüksek güç ve uygulama süresi hariç, 180W 30 d) argon plazmasına benzer şekilde yük-sehim grafiklerini yukarı yönde ötelediği görülmektedir. Oksijen plazmasının yüksek güç ve aşırı uzun uygulama süresinde kompozit performansını olumsuz etkilemesi, lifin yüzeyinde oksijen plazması nedeniyle oluşan kesit kaybına bağlanabilir.



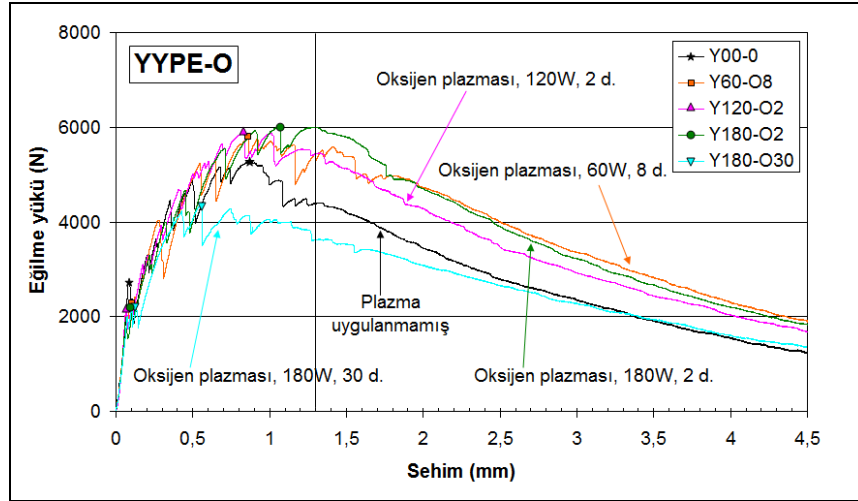
(a)



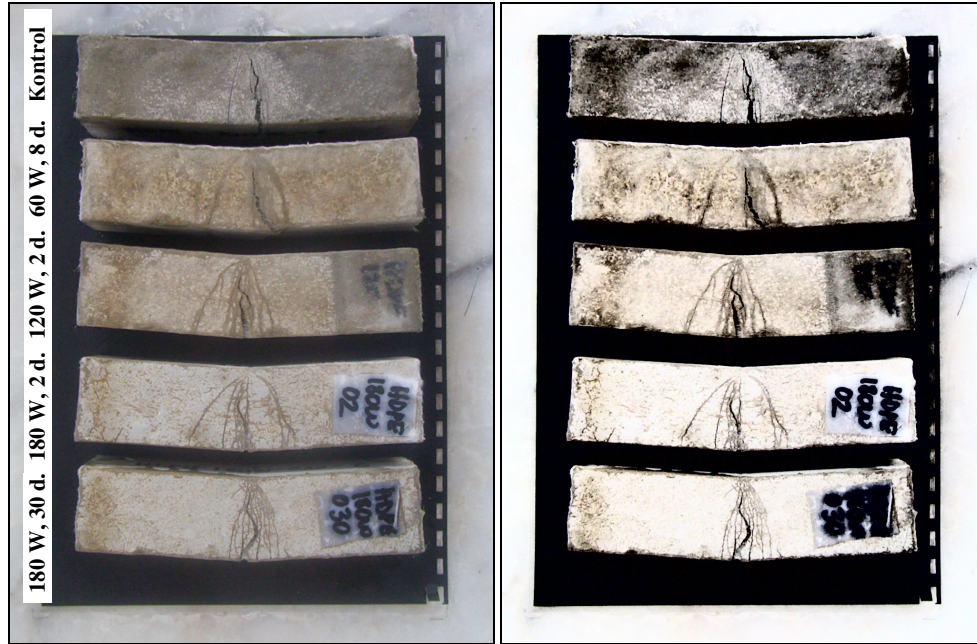
(b)

Şekil 4.67 Argon plazması uygulanmış lifli kompozitlerin; a) Yük-sehim eğrileri, b) Yükleme altında 4,5 mm sehim yaptıktan sonraki fotoğrafları.

Tüm örneklerin 4,5 mm sehime kadar yüklendikten sonraki yüzey görünümleri incelendiğinde, plazma gücüne ve etki süresine bağlı olarak oluşan çatlak sayısının önce arttığı ve örnekte dağılımının yayıldığı görülmektedir (Şekil 4.69b). Ancak en yüksek güç ve uygulama süresinde çatlaklar açıklık ortasında kümelenmiştir.



(a)

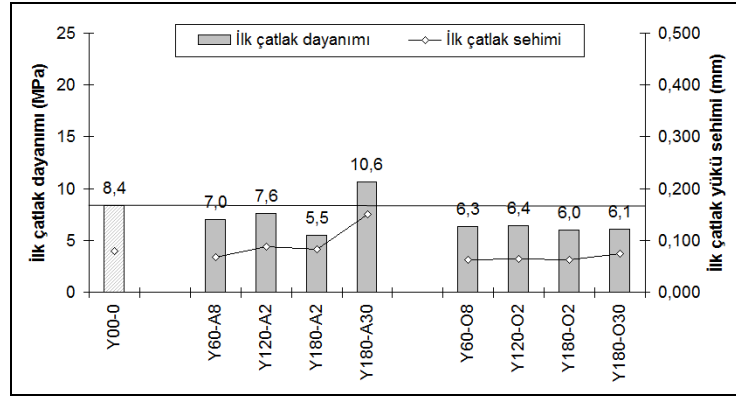


(b)

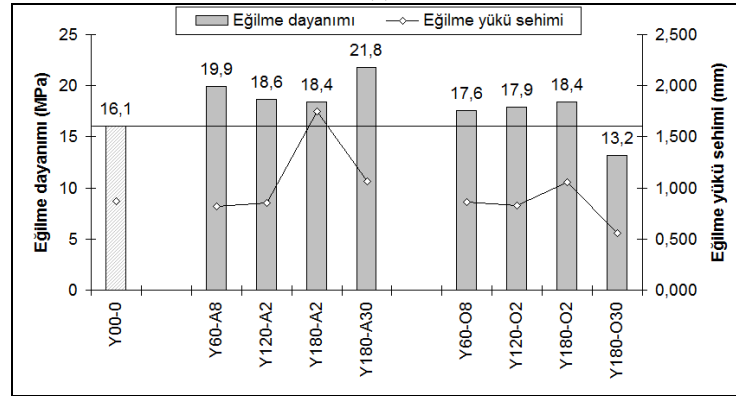
Şekil 4.68 Oksijen plazması uygulanmış lifli kompozitlerin; a) Yük-sehim eğrileri, b) Yükleme altında 4,5 mm sehim yaptıktan sonraki fotoğrafları.

4.5.2.3.3 Argon ve Oksijen Plazması Uygulanan YYPE Lifli Kompozitlerin Performanslarının Birlikte Değerlendirilmesi. YYPE lifli kompozitlerin plazma uygulaması ile ilk çatlak dayanımı ve ilk çatlak yükündeki sehim değerlerinin değişimi Şekil 4.69a'da sunulmuştur. İlk çatlak dayanımı, 180W – 30 dakika argon plazması dışındaki tüm koşullarda plazma uygulanmamış kompozitlere kıyasla daha

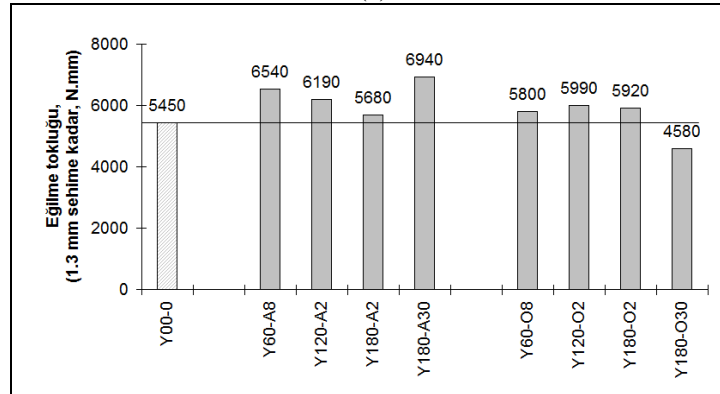
düşüktür. İlk çatlak yükü sehim de bu örnekte daha yüksek olup, diğer koşullarda kontrol örneği ile benzer ilk çatlak yükü sehim değerleri elde edilmiştir.



(a)



(b)



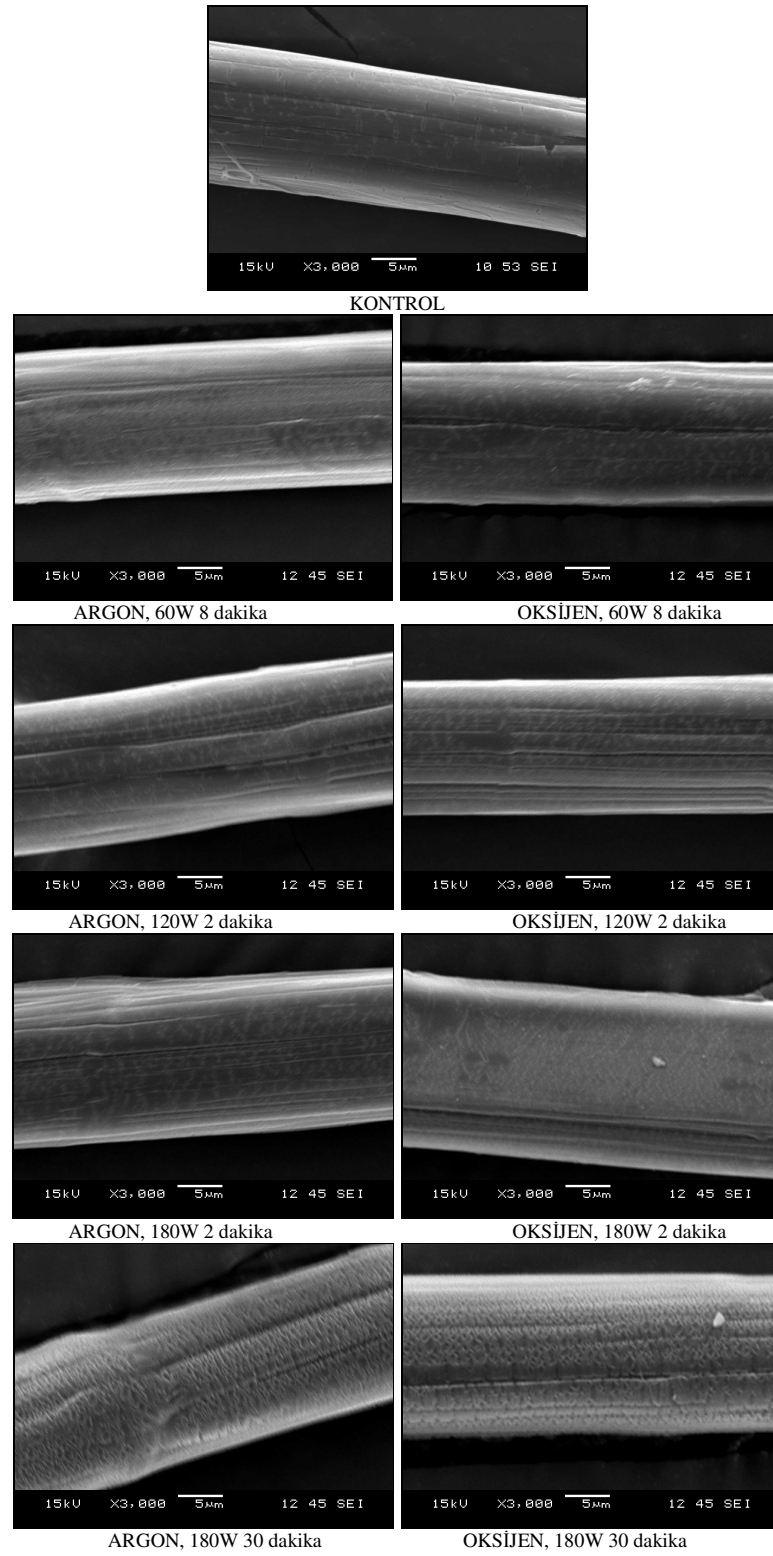
(c)

Şekil 4.69 Kompozitlerin; a) ilk çatlak dayanımı / ilk çatlak sehimleri, b) eğilme dayanımı / eğilme yükü sehim, c) tokluk değerlerinin liflere uygulanan plazma ile değişimi.

Argon ve oksijen plazması uygulamalarının eğilme dayanımı ve sehime etkisi Şekil 4.69b'de sunulmuştur. Plazma uygulanmış lifli serilerde, oksijen plazmasının 180W - 30 dakika uygulandığı seri dışında, tüm örneklerin eğilme dayanımları değişik oranlarda artmıştır. Eğilme dayanımındaki artış miktarı 1,5 ile 5 MPa arasında değişmektedir. Argon plazmasının 180W - 30 dakika uygulandığı örneklerin eğilme dayanımı plazma uygulanmamış örneklere kıyasla %35 oranında artmıştır. YYPE lifli kompozitler için eğilme dayanımı açısından, en uygun plazma koşulu 180W - 30 dakika argon plazması olarak belirlenmiştir. En yüksek eğilme yükünde örneklerin sehime değerleri argon plazması ile artma, oksijen plazması ile azalma eğilimindedir. Ancak dalgalanmalar da söz konusudur. En yüksek eğilme yükünde sehimi en yüksek yapan seri, 180W - 2 dakika argon plazmasının uygulandığı seridir (~1,7 mm).

Plazma uygulamalarının 1,3 mm'ye kadar olan tokluk değerlerine etkisi Şekil 4.69c'de karşılaştırılmaktadır. Eğilme dayanımında elde edilen sonuçlara paralel şekilde, tokluk değerleri plazma uygulaması ile artmıştır. Ancak oksijen plazması 180W - 30 dakika uygulanınca kompozit tokluğunu olumsuz etkilemiş, %16'lık azalmaya neden olmuştur. Diğer plazma uygulamaları ise, toklukta %5-30 arasında artışa neden olmuştur. Burada açıklığın 1/100'üne kadar yük-sehime eğrisi altında kalan alan hesaplanarak elde edilen tokluk değerleri karşılaştırılmıştır. Ancak 1,3 mm sehinden sonra da kompozitlerin yük-sehime grafikleri arasında önemli farklılıklar olduğu vurgulanmalıdır. Örneğin, 180W - 2 dakika argon plazması uygulanmış lifli kompozitte en büyük eğilme yüküne yaklaşık 1,7 mm'de ulaşıldığı için, 1,3 mm sehime kadar olan tokluk değeri, gerçek performansını yansıtamamaktadır. Çoklu çatlak potansiyelinin arttırılması ile en büyük yükteki sehime değeri ileriye ötelenmektedir.

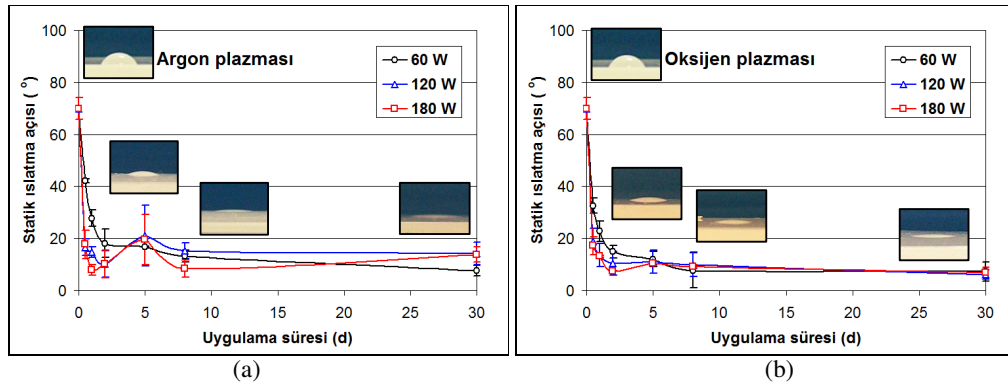
Plazma uygulaması ile YYPE lif yüzeylerinde meydana gelen fiziksel ve fizikokimyasal değişiklikler PP liflere benzemektedir. Her iki lif de olefin kökenli olduğu için plazma uygulamasından benzer şekilde etkilendikleri düşünülmektedir. Liflerin plazma uygulaması sonrasında taramalı elektron mikroskobu ile çekilen fotoğrafları çekilmiştir (Şekil 4.70).



Şekil 4.70 Argon ve oksijen plazması uygulanan YYPE liflerin yüzey görünümleri.

Bir önceki sayfada sunulan fotoğraflardan, plazma gücü ve uygulama süresi ile yüzeyde mikro boyutta meydana gelen pürüzlenmeyi gözlemlemek mümkündür (Şekil 4.70). Söz konusu pürüzlenme argon plazması için kompozit performansını arttırırken, oksijen plazmasının oluşturduğu pürüzlenme kompozit performansını olumsuz etkilemiştir. Bu sonuç lif yüzeyinde meydana gelen pürüzlenmenin her zaman kompozit performansını olumlu etkilemediğini göstermektedir. Oksijen plazması ile lifte meydana gelen pürüzlenme lifin kendi dayanım özelliklerini de olumsuz etkilemiştir. Pürüzlenme ile birlikte lif yüzeyinin kimyasal yapısında meydana gelen değişiklikler de lifin performansını olumsuz etkilemiştir.

Argon ve oksijen plazmalarının YYPE yüzeylerde ıslanabilirliği arttırdığı, yüzeye yeni hidrofil $-OH$ bağlarının bağlandığı düşünülmektedir. YYPE plakalar üzerinde yapılan ıslatma açısı ölçümlerinde, yüzeyde meydana gelen ıslanabilirlik değişimi Şekil 4.71'de görülmektedir. Lif yüzeylerinin hidrofil hale getirilmesi matris ile aderansı arttıracığından, plazma uygulaması ile kompozit performansındaki artışlar plazmanın kimyasal etkisi ile dolaylı olarak ilişkilendirilebilir. Ancak fiziksel etkinin aşırı artışı, söz konusu kimyasal etkinin önemsizleşmesine neden olabilir.



Şekil 4.71 Argon ve oksijen plazması uygulanan YYPE plakaların ıslatma açısı değişimleri.

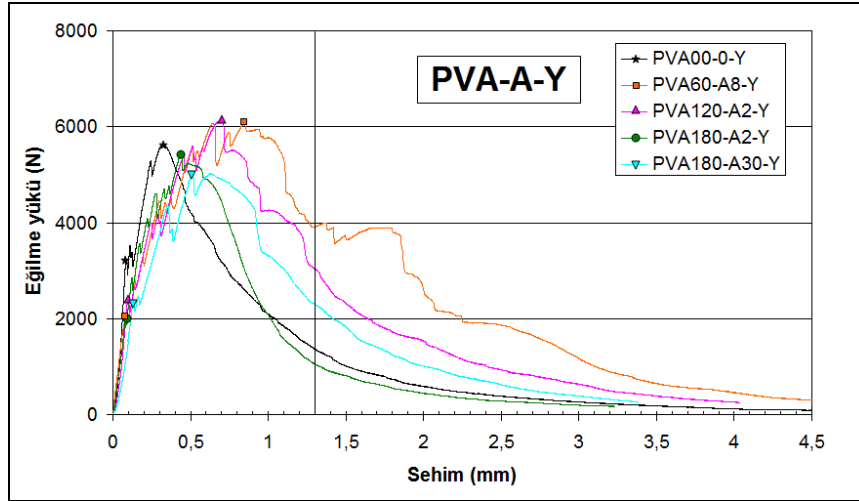
4.5.2.4 Plazma Uygulaması Sonrasında Yağlanan Polivinil Alkol (PVA) Liflerin Kompozit Performansına Etkileri

PVA liflerin PP ve YYPE liflerden farklı olan yüzey yapısı nedeniyle, kompozit tokluğunu arttırmak amacıyla farklı bir uygulama gerçekleştirilmiştir. PVA liflerin

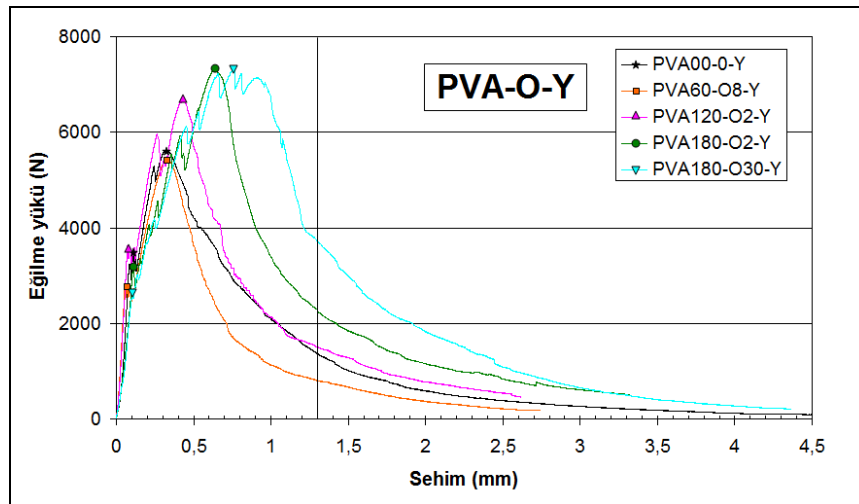
yüzeyleri önce farklı plazma koşullarında aktive edilmiş ve daha sonra lif yüzeyleri yağlanmıştır. Böylece yağ moleküllerinin lif yüzeyine bağlanarak matrise geçmesi engellenmiştir. Aktivasyon için hem argon hem de oksijen plazmalarında, daha önceki bölümlerde incelenen güç ve uygulama süresi koşulları kullanılmıştır. Diğer serilerde olduğu gibi, bu seride de MI matrisi kullanılmıştır. PVA liflerin %1 oranında kullanımının çoklu çatlak performansı açısından, uygulanan yükleme durumunda her zaman yeterli olmadığı lif-matris karşılaştırma bölümünde edinilen tecrübe ile belirlenmiştir. Bu nedenle çoklu çatlak potansiyelinin daha belirgin olduğu %2 kullanım oranında çalışılmıştır. Perdahlanabilirlik açısından %2 kullanım oranı zorluk yaratmaktadır. Ancak diğer liflere (PP, YYPE) kıyasla yoğunluğu en fazla olan ($1,3 \text{ g/cm}^3$) ve en kısa olan (8 mm) lifler olduğu için, %2 kullanım oranında perdahlanabilirliği en az etkileyen lifler, PVA lifleridir. PVA liflerin %2 kullanımı, açılan çatlaktaki lif sayısını arttırdığı için, lif yüzeyinde yapılan değişikliğin etkisini daha iyi ortaya çıkaracağı söylenebilir.

PVA lifli kompozitlerin yük sehim grafikleri, üç farklı örnekten elde edilen değerlerin ortalaması kullanılarak çizilmiştir. Ayrıca ortalama eğrinin elde edildiği örneklerin yük-sehim eğrileri EK-E’de sunulmuştur.

4.5.2.4.1 Argon ve Oksijen Plazması Sonrası Yağlanan PVA Lifli Kompozitlerin Performanslarının Karşılaştırılması. Argon plazması sonrasında yağlama, %2 lif içeren kompozitlerin yük-sehim grafiklerinde değişikliğe neden olmaktadır (Şekil 4.72a). En büyük eğilme yükü çok fazla artmasa da tokluk açısından önemli olan en büyük eğilme yükündeki sehim değeri, plazma uygulaması ile artmaktadır. Düşük güç ve uygulama süresi (60W - 8 dakika) en iyi performansı vermiştir. Argon plazması uygulaması ile en büyük sehim değerinde, yük-sehim eğrisi altında kalan alan artmaktadır. Sadece yağlanmış örneklerde açılan ilk çatlaktan sonra yeni çatlak açılmadığı, plazma sonrası yağlanmış örneklerde ise liflerin sıyrılma ile yük aktarma derecelerinin bir miktar arttırıldığı söylenebilir. Ancak yük YYPE liflerde olduğu gibi, 4.5 mm sehim değerine kadar yüksek seviyelerde kalamamaktadır (Şekil 4.72a).



(a)



(b)

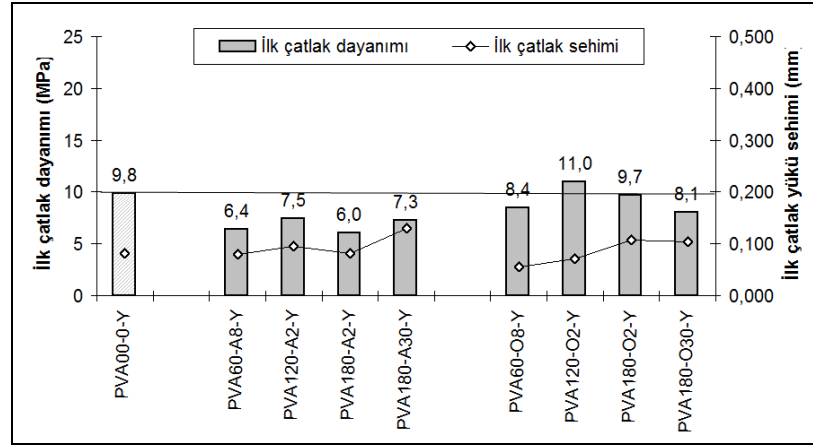
Şekil 4.72 Argon ve oksijen plazması uygulandıktan sonra yağlanan PVA lifli kompozitlerin yük-sehim eğrileri.

Oksijen plazması sonrası yağlanan PVA lifli kompozitlerin yük-sehim eğrileri Şekil 4.72b'de görülmektedir. Uygulanan plazma gücüne bağlı olarak eğilme dayanımı artmakta, aynı zamanda en yüksek eğilme yükünün elde edildiği sehim değeri de ileri ötelenmektedir. Plazma sonrası yağlama ile kompozitlerin çoklu çatlak oluşturma potansiyeli artırılarak, birden fazla kesitte liflerin köprüleme ile yük taşınması sağlanmıştır. Bu durum hem eğilme dayanımını hem de tokluk değerini arttırmıştır.

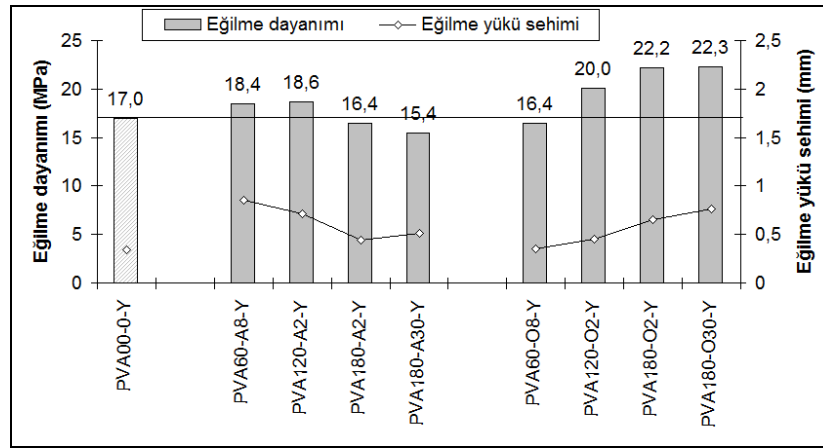
PVA lifli kompozitlerin plazma sonrası yağlama ile ilk çatlak dayanımlarının ve ilk çatlak yükü sehim değerlerinin değişimi Şekil 4.73a'da sütun grafikler halinde verilmiştir. Bu grafikten oksijen plazması sonrasında yağlamanın, PVA lifli kompozitlerin ilk çatlak dayanımlarını arttırdığı, argon plazması sonrası yağlamanın ise aynı derecede etkili olmadığı görülmektedir. İlk çatlak yükü sehim değeri ise çok fazla değişmemekle beraber, argon plazması sonrası yağlamanın sehim bir miktar arttırdığı söylenebilir.

Eğilme dayanımlarının sunulduğu Şekil 4.73b'de argon ve oksijen plazmaları sonrasında yağlanmış kompozitlerin performansları karşılaştırılmıştır. Düşük plazma güçlerinde argon plazması uygulaması, eğilme dayanımında 1-2 MPa gibi küçük artışlar sağlarken, yüksek plazma güçlerinde eğilme dayanımını azaltmıştır. Oksijen plazması için ise tersi bir durum söz konusudur. Yüksek plazma güçlerinde eğilme dayanımında 5 MPa gibi önemli eğilme dayanımı artışları kaydedilmiştir. Diğer taraftan düşük plazma güçleri aynı derecede etkili olmamıştır. En büyük eğilme yükündeki sehim değerleri de çoğunlukla eğilme dayanımına paralel şekilde değişmiştir.

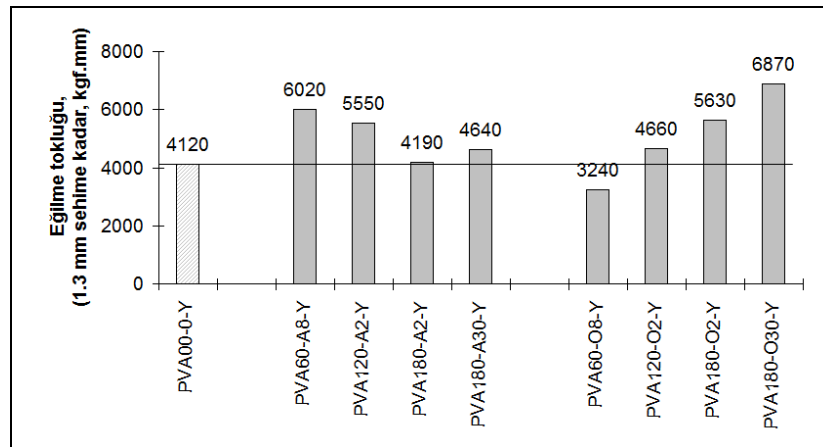
Yaklaşık 1 mm sehimde en yüksek eğilme yüküne ulaşan PVA60-A8-Y ve PVA180-O30-Y örneklerinde, yükün yoğunlaştığı orta bölgede çok sayıda çatlak meydana gelmiştir (Şekil 4.74). PVA lifli kompozitlerin tokluk değerlerinin karşılaştırıldığı Şekil 4.73c'de, argon ve oksijen plazması koşullarının kompoziti farklı şekilde etkilediği görülmektedir. En iyi performansları eğilme dayanımına paralel şekilde PVA60-A8-Y ve PVA180-O30-Y örnekleri vermiştir. Bu serilerde tokluk, yağlanmış kontrol örneğine kıyasla %50'den fazla artmaktadır.



(a)

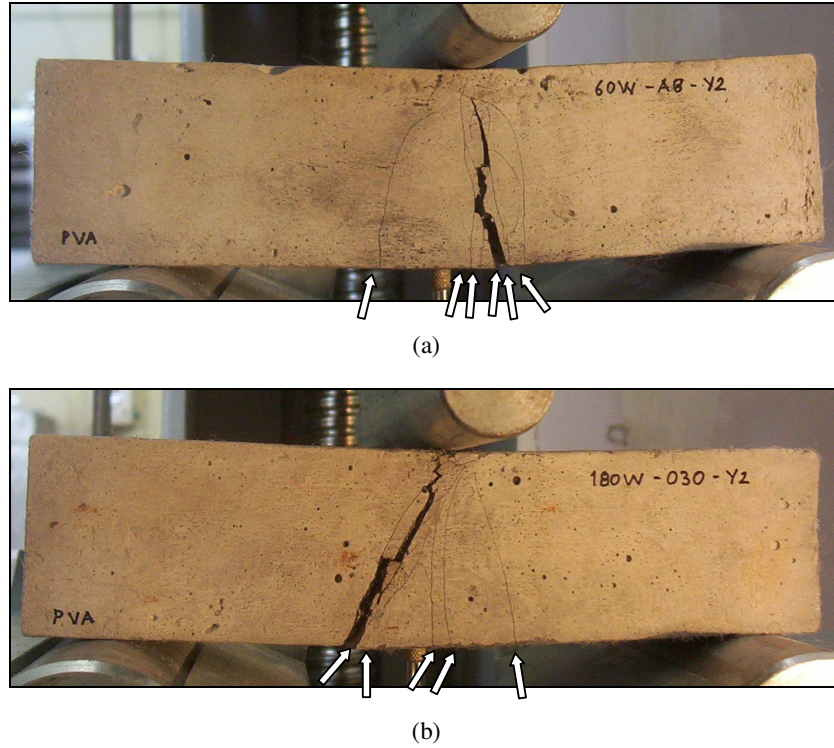


(b)



(c)

Şekil 4.73 Kompozitlerin; a) ilk çatlak dayanımı / ilk çatlak sehimleri, b) eğilme dayanımı / eğilme yükü sehim, c) tokluk değerlerinin liflere uygulanan plazma ile değişimi.



Şekil 4.74 En yüksek tokluk değerlerinin elde edildiği örneklerin çatlak görünümleri; a) 60W, 8 dakika argon plazmasından sonra yağlama, b) 180W, 30 dakika oksijen plazmasından sonra yağlama.

4.5.3 Üçüncü Aşama Deneyisel Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçlar

- PP ve YYPE liflerin hidrofor ve pürüzsüz yüzey yapıları, farklı plazma koşulları yardımı ile değişik oranlarda hidrofil ve pürüzlü hale getirilmiştir. Bu yolla lif-matris arasındaki bağın hem fiziksel, hem de fizikokimyasal olarak modifiye edildiği lifler kompozit performansını belirgin ölçüde değiştirmektedir. Bu etki eğilme dayanımı ve tokluğu çoğunlukla olumlu yönde geliştirmiştir. Ancak plazma gücü ve uygulama süresine bağlı olarak, bazı plazma koşullarında kompozit performansında gerileme veya negatif yönde değişim meydana geldiği gözlenmiştir. Plazma şiddetinin aşırı artırılması yüzeydeki pürüzlenme derecesini arttırmakta ve lifte kesit kaybına neden olarak kompozit performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Diğer taraftan kısa süreli ve düşük güçlerde plazma uygulamanın da, kompozit performansında önemli bir değişikliğe neden olmadığı durumlar kaydedilmiştir. Ancak her plazma türü ve lif tipi için söz konusu plazma gücü ve uygulama süresi değişken olduğu için genelleme

yapmak uygun değildir. En uygun plazma gücü ve süresi ön denemelerde belirlenerek kompozit performansı en üst düzeye çıkarılabilir. Bu çalışmada PP lifler için tokluğu ve eğilme dayanımını %80-85 oranında arttıran, 120W – 2 dakika argon plazması koşulunun en uygun olduğu belirlenmiştir. Ayrıca YYPE lifler için tokluğu %35 ve eğilme dayanımını %27 arttıran 180W – 30 dakika argon plazması koşulunun en etkili olduğu yapılan deneylerle bulunmuştur. YYPE liflerde en yüksek güç ve uygulama süresi argon plazması için en iyi performansı verirken, oksijen plazmasında aynı güç ve uygulama süresi kompozitte en kötü performansa neden olmuştur. Büyük olasılıkla, YYPE lifin mekanik özellikleri, etkili oksijen plazmasının yarattığı aşırı kesit kaybı nedeniyle olumsuz etkilenmektedir.

- PP liflerde tokluk performansının plazma uygulaması ile artışı, eğilme etkisi altında oluşan çatlak sayısının artışına bağlanmıştır. Ancak, PP lifli kompozitlerde eğilme etkisi altında oluşan çatlak sayısı 2-3'ü geçmemektedir. Plazma uygulanan liflerin kullanıldığı tekil çatlak meydana gelen örneklerde de tokluk artışı olmuştur. Bu bağlamda, PP lifli kompozitlerin tokluk artışında lifin sıyrılırken, aynı sehim için daha yüksek yük değerlerini taşıması da önemli derecede etkili olmuştur. YYPE ve PVA lifli kompozitlerde ise, ilk çatlak anında yük düşüşü derecesi PP lifli kompozitlere kıyasla çok daha düşüktür. Ayrıca açılan ilk çatlağın, açılma anında gözle görülemeyecek derecede küçük olduğu belirlenmiştir. Bu çatlak sehim artışı ile zamanla açılarak gözle görülür hale gelmektedir.

- YYPE liflerde tokluk performansının plazma uygulaması ile artışı, eğilme etkisi altında oluşan çatlak sayısının artışı ile doğrudan ilişkilidir. Eğilme deneyi sırasında yapılan gözlemlerde, YYPE lifli kompozitlerde çatlak sayısının artışı ve örneğe dağılma derecesinin yük-sehim eğrisi altında kalan alanı arttırdığı görülmüştür.

- PP lifli örneklerde ilk çatlak sonrası ani yük düşüşü ve ilk çatlağın oluşur oluşmaz gözle görülmesi bu örneklerin karakteristik davranışıdır. Plazma uygulaması ile ilk çatlak anında yük düşüşü oranı önemli ölçüde azaltılmıştır. Liflerin yükü tekrar taşıyarak sehim artışı ile köprülenen yük seviyesini arttırma kapasiteleri plazma uygulaması ile önemli derecede geliştirilmiştir.

- YYPE liflerde çoklu çatlak potansiyeli, plazma uygulanmamış lifli serilerde de mevcuttur. Ancak plazma uygulaması ile çatlak sayısı artmakta ve çatlakların örnek üzerine yayılma alanı genişlemektedir. Bu sonuç, liflerin plazma uygulaması ile geliştirilen aderans özelliklerinin, açıklık ortasında yoğunlaşan gerilmeyi örnek geneline yaymadaki etkinliğinin bir göstergesidir. Modifiye lifler sayesinde yük, kompozit geneline etkili bir şekilde yayılmaktadır.

- PVA lifler yüzey yapısı nedeniyle çimento bazlı matris ile güçlü bir aderans oluşturmakta ve yüksek eğilme dayanımlarına ulaşılmasını sağlamaktadır. Burada liflerin yüksek mekanik özellikleri de önemli rol oynamaktadır. İncelemelerde kullanılan PVA rec 15 lifinin çekme dayanımı 1600 MPa, elastisite modülü ise 42 GPa'dır. Ancak liflerin söz konusu yüksek aderansı nedeniyle kopması ile en büyük eğilme yükü sonrasında, sehim artışı ile birlikte hızlı bir yük düşüşü görülmektedir. Plazma sonrası yağlamanın lif performansına etkisi kapsamlı bir deney programı yardımıyla incelenmiştir. Plazma sonrası yağlanmış lifli kompozitlerin tokluğunun plazma gücü ve süresine bağlı olarak arttırılabileceği belirlenmiştir. Aynı zamanda plazma sonrası yağlama ile çoklu çatlak davranışı geliştirilebilmektedir. Çoklu çatlak davranışını ve tokluk değerini en fazla arttıran yağlama öncesi plazma koşulları, 180W - 30 dakika oksijen plazması ve 60W - 8 dakikalık argon plazmasıdır. Söz konusu koşullarda tokluk değerinde, yağlanmış kontrol lifli örneğe göre %50'den fazla artış kaydedilmiştir.

BÖLÜM BEŞ

MİKRO BETON KARIŞIMLARININ BETON YÜZEYLERE ADERANSI İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Mikro beton karışımları uygulamada panel eleman şeklinde üretilerek kullanılabileceği gibi, yerinde üretilip onarım ve tamirat amaçlarıyla da kullanılabilir. Bu bölümde fiziksel ve mekanik özellikleri incelenen mikro beton karışımlarından bazılarının, beton yüzeylere aderans özellikleri çekme-koparma deneyleri ile araştırılmıştır. Kullanılan tasarımlar, deney yöntemi ve elde edilen bulgular sırasıyla sunulacaktır.

5.1 Taban Betonu Örneklerinin Hazırlanması

Çekme koparma deneyinde taban betonu olarak kilit parke taşları kullanılmıştır. Betondan imal edilmiş benzer özellikteki kilit parke taşları temin edilmiş ve beşerli partiler halinde gruplandırılmıştır.

Kilit parke taşlarının mukavemet özellikleri TS 2824 EN 1338 standardına göre belirlenmiştir. Söz konusu standartta, Şekil 5.1’de şematize edilen yöntemle parke taşı yarma mukavemeti deneyi yapılmaktadır. Deney sonucu elde edilen yarıma yükü kullanılarak aşağıdaki formül yardımıyla yarma dayanımı hesaplanmaktadır.

$$T = 0,637 \times k \times P/(l \times t) \quad (5.1)$$

Burada,

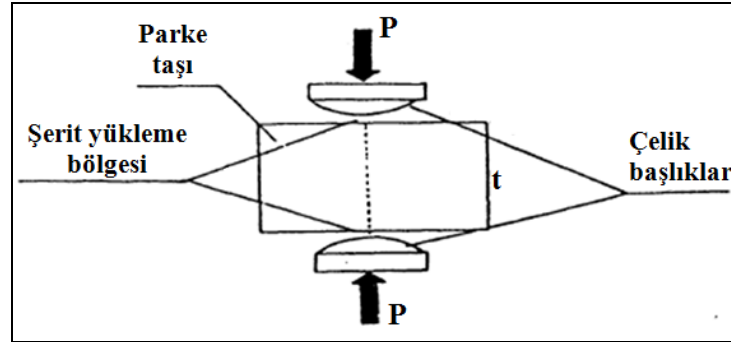
l = Çizgisel yükün uygulandığı şerit uzunluğu (mm)

t = Parke taşı kalınlığı (mm)

T = Parke taşı yarma dayanımı, (MPa)

P = Kırılma yükü, (N)

k = Parke taşı kalınlığı düzeltme katsayısı ($k = 1,3 - 30 (0,18 - t/1000)^2$)



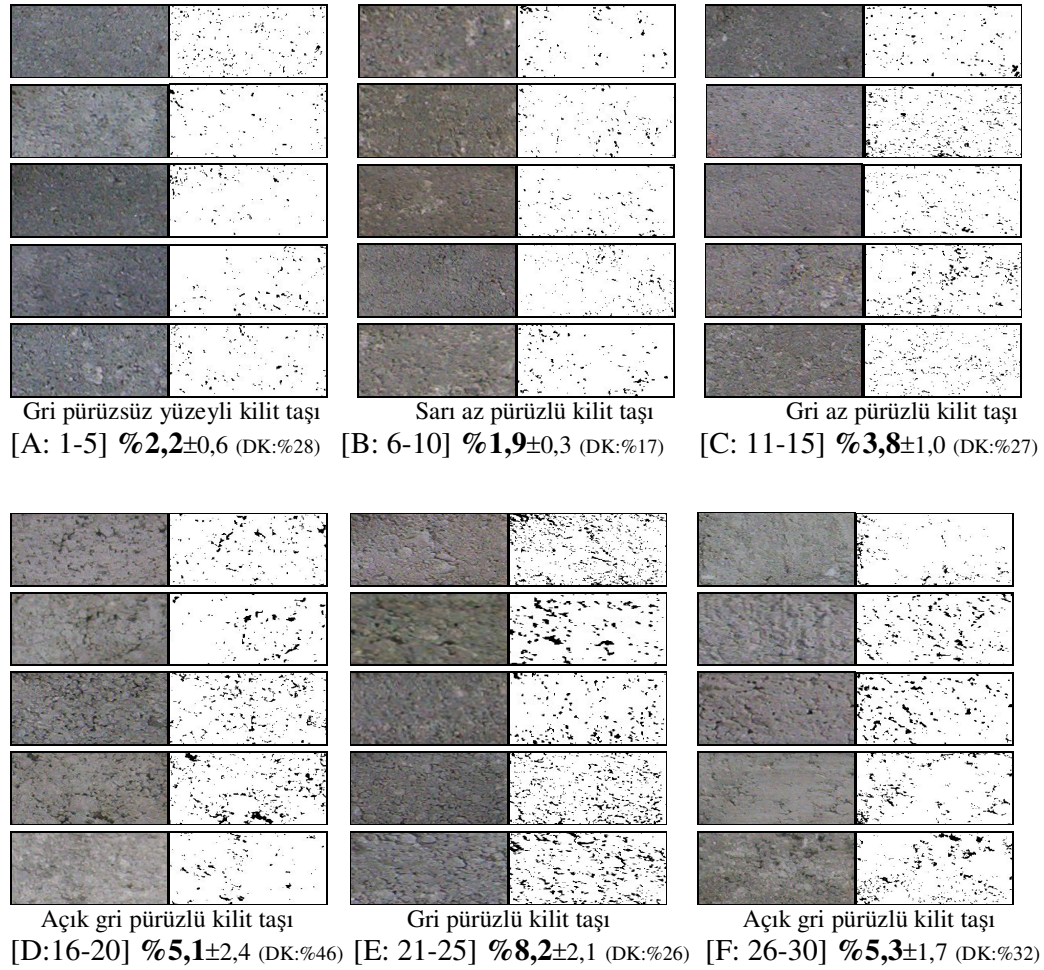
Şekil 5.1 Parke taşı yarma dayanımı ölçüm düzeneği.

Beşerli partiler halinde gruplandırılan parke taşlarının yarma dayanımları her setten üçer örnek kırılarak belirlenmiştir. Elde edilen ortalama yarma dayanımı değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir. Yarma dayanımları 2,5-3,5 MPa arasında değişmektedir. TS 2824 EN 1338 standardına göre her bir parke taşının yarma dayanımı 2,8 MPa’dan yüksek olmalıdır.

Tablo 5.1 Parke taşı setlerinin ortalama yarma dayanımları.

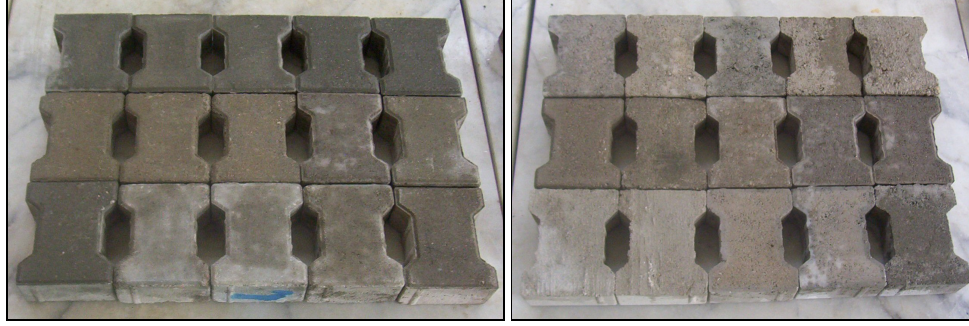
Parke taşı setleri	Yarma dayanımı (MPa)
Set A (1-5)	2,96
Set B (6-10)	2,75
Set C (11-15)	3,46
Set D (16-20)	3,44
Set E (21-25)	2,54
Set F (26-30)	2,71

Kilit parke taşlarının yüzey pürüzlülüğü, üzerlerine uygulanacak karışımın aderansını etkileyeceğinden, tüm örneklerin yüzey poroziteleri bir görüntü işleme programı kullanılarak belirlenmiştir. Tüm örneklerin yüzey fotoğrafları çekilmiştir. Örneklerin fotoğrafları, histogramlarında eşik değer 74-118 arasında değişecek şekilde ikili görüntüye çevrilmiş ve alansal porozite oranları belirlenmiştir. Şekil 5.2’de gruplandırılmış parke taşlarının anma adları ve yüzey makro pürüzlülüğü ile ilişkilendirilebilecek porozite değerlerinin ortalaması örneklerin birer temsili fotoğrafı ve ikili görüntüsüyle birlikte verilmiştir.



Şekil 5.2 Kilit taşlarının yüzey pürüzlülük analizi sonuçları (DK: değişkenlik katsayısı).

Fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenen beşerli gruplar halindeki altı set parke taşının yüzeyine, harç ve mikro beton karışımları uygulanmıştır. Her partideki örneklerin birincisine, kendiliğinden yerleşen kıvamdaki yalın mikro beton (MI-%1,2), ikincisine %1 PP lifli (MI-%1,2), üçüncüsüne %1 PVA lifli (MI-%1,2), dördüncüsüne %1 YYPE lifli (MI-%1,2) ve sonuncusuna da standart harç karışımları uygulanmıştır. Tüm mikro betonlarda MI matrisi kullanılmıştır. Böylece benzer pürüzlülüğe sahip taşların her birinde birer karışım test edilmiştir. Tüm kilit taşları fırça ile temizlenmiş yüzeyleri tozdan ve zayıf parçacıklardan arındırılmıştır. Ayrıca deneyden önce tüm yüzeyler nemlendirilmiştir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3 Nemlendirilmiş kilit taşı yüzeyleri.

Yüzeylere uygulanacak tabakanın sabit kalınlıkta olması için 100 mm çaplı plastik su borusundan 10 mm kalınlığında halkalar kesilmiş ve yüzeye yerleştirilmiştir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4 Kilit taşı üzerine uygulanacak karışımlar için kalıp.

5.2 Aderans Örneklerinin Hazırlanması ve Beton Yüzeye Uygulanması

Kullanılan karışımların tümü daha önceki bölümlerde (Bölüm 3: reoloji, Bölüm 4: eğilme performansı) incelenen tasarımlar olup Tablo 5.2’de karışım oranları listelenmiştir. Bu karışımlar seçilerek kendiliğinden yerleşen özellikteki Mikro betonun (KYMB), beton yüzeye aderans açısından standart harçtan farkı incelenecektir. Ayrıca lifli MB serilerinin betona aderansının KYMB’ye kıyasla nasıl olduğunun lif tipine göre belirlenmesi hedeflenmiştir. Hazırlanan karışımlardan KYMB ve özellikle PP ve PVA lifli MB’ler herhangi bir sıkıştırmaya ihtiyaç duyulmadan, kalıba dökülerek yerleştirilmiştir. Sadece lifli MB serilerinde son bir perdah işlemi yapılmıştır. Ancak lif dozajının arttırılarak %2’ye çıkartılması halinde, PP ve YYPE lifli kompozitlerin yerleştirilmesinde sıkıştırma işlemine ihtiyaç

duyulacağı söylenebilir. Şekil 5.5’de karışımların kalıba yerleştirilme görüntüleri verilmiştir. Diğer taraftan standart harç karışımları tokmakla sıkıştırılarak yerleştirilmiş ve perdahlanmıştır (Şekil 5.6).

Tablo 5.2 Ağırlıkça kullanım oranları.

Karışım kodu	Çimento	Kireçtaşı tozu	Su	Kum*	Akışkanlaştırıcı katkı**	Lif ***
KYMB (MB %1,2)	1	1	0,44	-	%1,2	-
PP %1 (MB %1,2)	1	1	-	-	%1,2	%1
PVA %1 (MB %1,2)	1	1	-	-	%1,2	%1
YYPE %1 (MB %1,2)	1	1	-	-	%1,2	%1
Standart harç (SH)	1	-	0,50	3	-	-

* Standart kum kullanılmıştır.

** Çimento ağırlığının %’si

*** Toplam hacmin %’si



Şekil 5.5 Lifli MB’lerin kalıba dökümü.

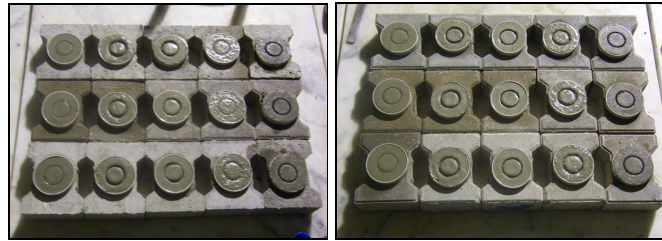
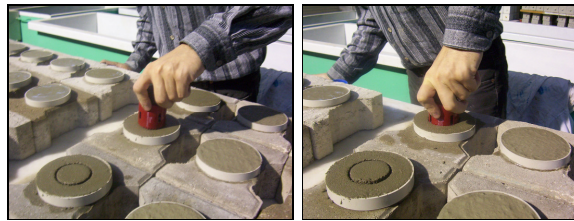


Şekil 5.6 Standart harç karışımlarında uygulanan sıkıştırma işlemi.

Tüm yüzeylerin perdahlama sonrası görünümleri Şekil 5.7’de verilmiş olup, %1 lif dozajında lifli MB’lerde perdahlama sorunu görülmemiştir. Çekme koparma deneyi için 50 mm çaplı yüzeyin oluşturulması gerekmektedir. Bu amaçla iz açılmasına yönelik dairesel bıçak kullanılmıştır. Taze standart harç prizini almadan iz açılmıştır. Mikro betonlarda ise kendiliğinden yerleşen kıvamda oldukları için hemen iz açılmamış, katılaşmaları için 3-4 saat beklenmiştir (Şekil 5.8). İz açma esnasında lifli örneklerde, liflerin izin açılmasını zorlaştırdığı belirlenmiştir. İz açma işlemi tamamlanan örnekler dökümü izleyen üç gün boyunca nemli bezle sürekli kür edilmiştir. Üçüncü günün sonunda kür işlemi sonlandırılmış, örnekler laboratuvarında açıkta bekletilmeye başlanmıştır. İz açma işlemi karot makinesi yardımıyla da gerçekleştirilebilir.



Şekil 5.7 Perdahlanmış yüzeyler.



Şekil 5.8 Perdahlanmış yüzeylerde iz açma işlemi.

Dökümden bir hafta sonra yüzeyleri kuruyan örneklere 50 mm çaplı alüminyum piyonlar yapıştırılmıştır. Yapıştırma için iki bileşenli epoksi kullanılmıştır (Sikadur 31) (Şekil 5.9). Epoksinin kür süresi 20°C sıcaklıkta bir gündür.



Şekil 5.9 İki bileşenli Epoksi yapıştırıcı ile alüminyum piyonların yapıştırılması.

5.3 Aderans Deneylerinin Yapılışı

Bir aylık bekleme sonrasında örneklerin çekme koparma testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme koparma deneylerinde ASTM D4541 standardı Tip V'e uygun portatif bir cihaz kullanılmıştır (Defelsko Positest AT, USA, Şekil 5.10). Cihaz kendiliğinden düzelenme özelliği ile düzgün olmayan yüzeylerde bile çekme kuvvetini gerilme alanına uniform yaymayı sağlayıcı bilyeli bir başlığa sahiptir (Şekil 5.10). Farklı çaplarda yüzeylere yapıştırılabilen piyonlar yardımıyla farklı

gerilme kapasitelerinde deney yapılabilir. Beton yüzeylere uygulanan tamir işlemlerinde genellikle tavsiye edilen piyon çapı 50 mm olup, deneysel çalışmalarda bu çaptaki piyonlar kullanılmıştır. Cihazın çekme gerilmesi sınırı, 50 mm'lik piyon çapı için 3,5-4 MPa'dır.



Şekil 5.10 Positest çekme koparma test cihazı ve engeli yüzeylerde üniform yük dağılımını sağlayan bilyeli sistem.

Çekme koparma testleri sabit çekme gerilmesi hızıyla gerçekleştirilmiştir (0,2-0,5 MPa/s). Deneyin başlangıcında bilyelerin oturması için 0,1-0,2 MPa'a kadar yavaş bir önyüklemeye gerçekleştirilmektedir, ardından çekme gerilmesi uygulama hızı 0,2-0,5 MPa/s arasında tutulmuştur (Şekil 5.11). Bazı örneklerde çekme koparma cihazının 50 mm çaplı piyon için limiti olan 3,5 MPa değeri aşılmıştır. Bu örneklerde cihaz sınırları aşıldığı için deney durdurularak sonlandırılmıştır.



Şekil 5.11 Çekme koparma testlerinin yapılışı.

5.4 Deney Sonuçları ve Bulguların Yorumlanması

Çekme koparma deney sonuçları Tablo 5.3’de topluca listelenmiştir. Yapılan 30 çekme koparma deneyinden 17 tanesinde, kopma beton ile uygulanan karışım arasından olmuştur. Diğer 13 tanesinde ise kopma beton ile matris arasından değil de, matris içinden epoksiye yakın tabakadan olmuştur. Bu örneklerde yapıştırılan tabakanın beton ile aderansı, yüzeydeki epoksi aderansından daha yüksek olduğu için, betona aderanslarının elde edilen değerlerden daha yüksek olduğu kabul edilebilir. Ancak en azından elde edilen değerler kadar aderansları olduğu düşünülecek olursa, güvenli tarafta kalmak için, çekme koparma dayanımı değerlerinin bu değerler olduğu kabul edilebilir.

Tablo 5.3 Çekme koparma deneyi sonuçları.

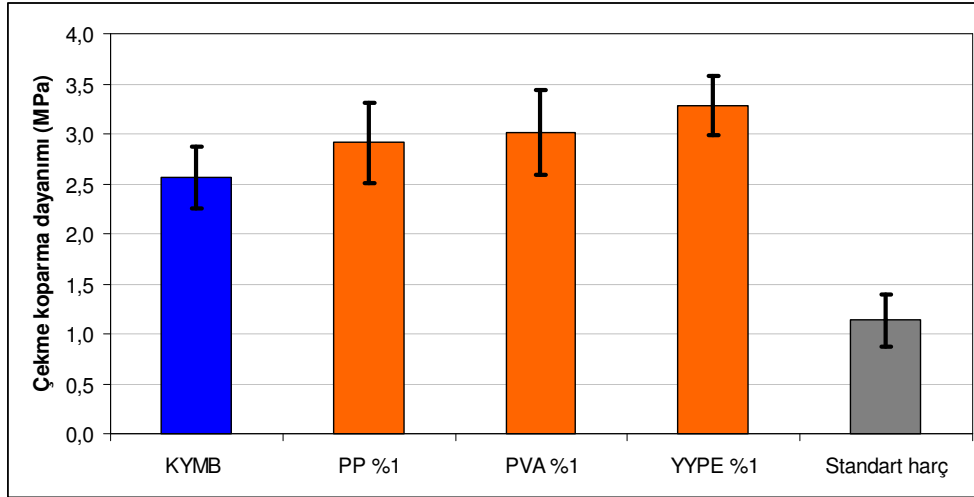
Çekme koparma dayanımı (MPa)		Yüzeye uygulanan karışım				
Yüzey özelliği		KYMB (MB %1.2)	PP %1	PVA %1	YYPE %1	Standart harç
A	Gri pürüzsüz yüzeyli kilit taşı	1,95	1,69	2,80*	3,05*	1,31
B	Sarı az pürüzlü kilit taşı	2,42	2,88	2,44*	3,17*	1,06
C	Gri az pürüzlü kilit taşı	2,62*	3,22	2,89	2,90*	-
D	Açık gri pürüzlü kilit taşı	2,16*	3,22	3,09	3,39*	1,09
E	Gri pürüzlü kilit taşı	2,58	2,99	3,62**	3,22*	0,89
F	Açık gri pürüzlü kilit taşı	3,01*	2,25*	3,02*	3,70**	1,50
İstatistiksel büyüklükler	Ortalama (MPa)	2,46	2,71	2,98	3,24	1,17
	Standart Sapma (MPa)	0,37	0,61	0,39	0,28	0,24
	Değişkenlik katsayısı (%)	15	23	13	9	20

* Epoksi mikro beton yüzeyinin üstünden tabaka kopararak ayrılmıştır. Mikro beton ile beton arası halen sağlamdır.

** Çekme koparma dayanımı ölçümünde ASTM D4541 Tip V çekme koparma cihazı kullanıldığından limit dayanım değeri olan 3,5 MPa dır. Limit aşıldığı için deney durdurulmuştur.

Elde edilen sonuçlara göre betonun yüzey pürüzlülüğünden bağımsız olarak tüm setlerde hem KYMB’nin, hem de lifli MB’lerin çekme koparma dayanımı standart harç karışımına kıyasla iki ile üç misli kadar daha yüksektir. Sonuçların farklı yüzeylerde değişkenlik katsayıları %9-23 arasında değişmektedir. Parke taşlarının yüzey pürüzlülükleri birbirine benzer olanları aynı partide gruplandırıldığı ve altı farklı set bulunduğu için genel ortalama değerler birbiri ile karşılaştırılabilir (Şekil 5.12). Kendiliğinden yerleşen mikro betonun çekme dayanımı ortalama

2,5 MPa olup lif ilavesi ile 3-3,5 MPa mertebelerine yükselmektedir. Standart harç örneklerinin çekme dayanımları ise ortalama 1,2 MPa civarındadır.



Şekil 5.12 Farklı taban pürüzlülüğüne sahip betonlara uygulanan karışımların ortalama çekme koparma dayanımları.

Çekme koparma deneyinde, kopmanın hangi kesitte gerçekleştiği elde edilen sonuçların yorumlanmasında önem kazanmaktadır. Çünkü aynı anda birden fazla malzeme ve bunların ara yüzeyleri çekme gerilmesinin etkisi altındadır. Tipik bir çekme koparma deneyinde kesit görünümünü Şekil 5.13’de verilmiştir. Kopma zincirin en zayıf halkasından gerçekleşecektir. Teorik olarak, kopmanın gerçekleştiği kesitle ilgili 4 ihtimal vardır. Şekil 5.14’de bu ihtimaller şematik olarak gösterilmiş olup, aşağıda kısaca özetlenecektir:

1. *Epoksi ile piyon arasının ayrılması veya epoksi içinden çatlak oluşup kopma:* Genellikle epoksilerin çekme dayanımları çimento esaslı malzemelere göre daha yüksek olduğundan bu ihtimal pek sık karşılaşılmayan bir durumdur. Epoksinin hazırlanmasında yapılabilecek hatalardan, epoksi kürünü almadan deneye başlamadan veya piyon yüzeyinin kirli, yağlı olmasından kaynaklanabilir.

2. *Epoksi ile uygulanan tamir harcının yüzeyi arasından kopma*: Bu durum epoksinin uygulandığı tamir harcı yüzeyinin tozlu veya yağlı olmasından kaynaklanabilir. Aynı zamanda epoksinin tüm kesite yayılamaması halinde de gerilme yığılması olacağından epoksi matris arasından kopma meydana gelebilir.

3. *Uygulanan tamir harcı içinden kopma*: Eğer tamir harcının betona aderansı çok iyiye ve epoksi de tamir harcına iyi yapışmışsa kopma uygulanan karışım içinden meydana gelecektir. Bu istenen bir durumdur çünkü yapılan uygulamanın betona çok iyi yapıştığını göstermektedir.

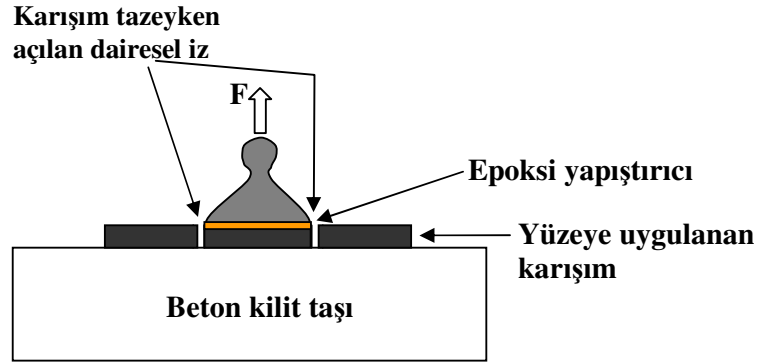
4. *Beton ile uygulanan tamir harcı arasından kopma*: Ara yüzeyden kopma sırasında koparılan parçanın yüzeyinde alttaki betondan parça kalıp kalmamasına göre üç farklı kopma şekli gözlemlenebilir (ASTM D 4541):

- İlk durum %100 adezif kopma denilen, tamir harcının beton yüzeyinden hiç parça sökmeden ayrılmasıdır. İstenen bir durum değildir. Tamir harcının betona aderansının zayıf olduğunu gösterir. Betonun pürüzsüz olması, az su emmesi, yüzeyinin kirli veya yağlı olması tamir harcı iyi yapışabilen türde bile olsa, bu şekilde kopmaya yol açabilir.

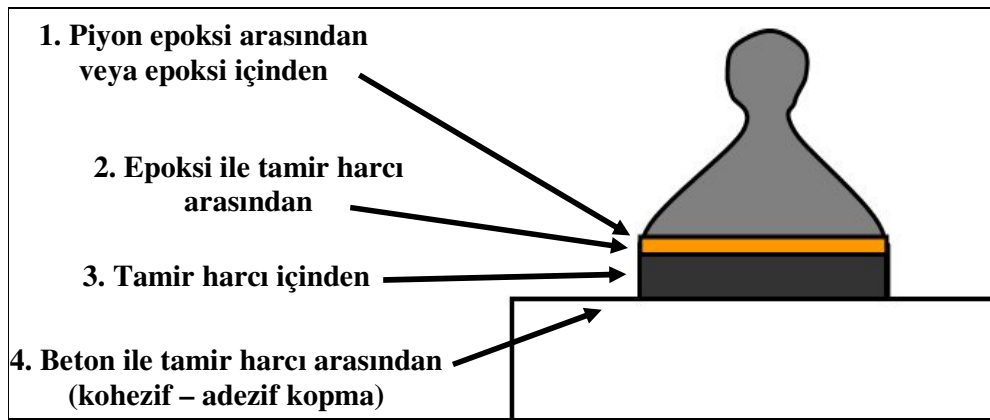
- İkinci durum %100 kohezif kopma denilen tamir harcının beton yüzeyinden kesiti kadar parça kopararak ayrılmasıdır. Betonun dayanımı da kohezif kopmanın oluşmasında önemlidir. İstenen bir durumdur ve aderansın iyi olduğunu gösterir.

- Son durum adezif ve kohezif kopmanın karma olarak meydana gelmesidir (Delucchi ve Cerisola, 2005). Örneğin, kopma sonrasında tamir harcı kesitinin %70'inde beton yapışık kalmışsa bu kopma %70 kohezif kopma olarak adlandırılabilir.

Kopma, beton ile uygulanan tamir harcı arasındaki kesit dışında hangi kesitten olursa olsun, elde edilen değer tamir harcının en küçük çekme koparma dayanımı olarak kabul edilebilir. Çünkü henüz tamir harcı ile beton arasındaki bağ sağlamdır.



Şekil 5.13 Tipik bir çekme koparma deneyinde kesit görünümü.

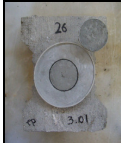


Şekil 5.14 Tipik bir çekme koparma deneyinde kopmanın meydana gelme ihtimali olan kesitler.

5.4.1 Kendiliğinden Yerleşebilirliğin Çekme Koparma Performansını Arttırması

Çekme koparma deneyinde kopmanın meydana geldiği kesitlerle ilgili sunulan bilgilerin ardından deneysel gözlemler açıklanacaktır. Çekme koparma deneyi sonrasında beton ve piyon kopma yüzeyleri Tablo 5.4’de verilmiştir. Genel olarak mikro betonlarda kopma ya beton ve mikro beton arasından betondan parça kopararak ya da mikro betonun içinden gerçekleşmiştir. Lifli mikro betonlarda kopma çoğunlukla epoksi ile yüzey arası bölgeye yakın kısımdan olmuştur ve 2,5 – 3 MPa dolaylarında çekme koparma dayanımı ölçülmüştür. Diğer taraftan standart harç kullanılarak hazırlanan örneklerde, kopmalar tüm örneklerde %100 adezif (betondan hiç parça koparmadan) olarak beton yüzeyinden gerçekleşmiştir.

Tablo 5.4 Çekme koparma deneyi sonrasında beton ve piyon kopma yüzeyleri.

Çekme koparma dayanımı (MPa)		Yüzeye uygulanan tasarım				
Yüzey özelliği		KYMB (MB %1,2)	PP %1	PVA %1	YYPE %1	Standart harç
A	Gri pürüzsüz yüzeyli kilit taşı					
B	Sarı az pürüzlü kilit taşı					
C	Gri az pürüzlü kilit taşı					
D	Açık gri pürüzlü kilit taşı					
E	Gri pürüzlü kilit taşı					
F	Açık gri az pürüzlü kilit taşı					

Çekme koparma deneyi sonrasında piyon kopma yüzeylerinin yakından görünümü Şekil 5.15’de verilmiştir. Ayrıca tüm örneklerin kopma yüzeyleri incelenerek kopmanın kohezif olma oranı belirlenmiştir (Tablo 5.5). Elde edilen sonuçlar, mikro beton ile standart harç örnekleri arasında belirgin bir aderans performansı farklılığı olduğunu kanıtlamaktadır. Bu fark örneklerin uygulama kıvamı ile yakından ilişkilidir. Kalıplara kolayca yerleştirilen kendiliğinden yerleşen mikro beton, makro boşluklara sızmakta ve beton ile yapışma yüzeyi alanını arttırmaktadır (Şekil 5.16a).

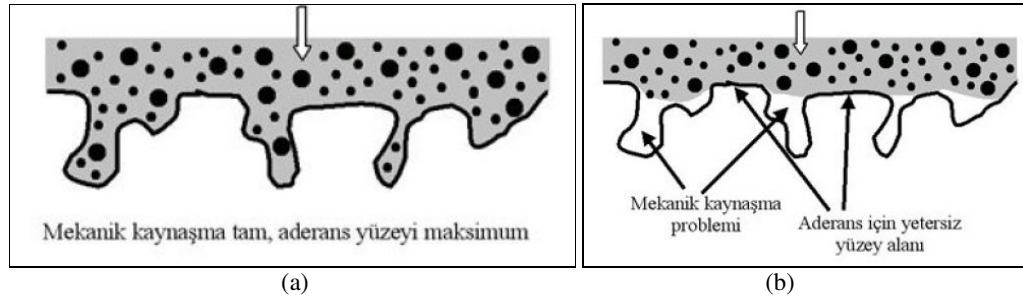
Böylece iki malzeme arasında daha iyi bir kenetlenme olmaktadır. Diğer taraftan standart harç sıkıştırılarak yerleştirildiği kalıpta kıvamı nedeniyle boşluklara sızamamakta ve kenetlenme alanını arttıramamaktadır. Bu durum Şekil 5.16b’de şematize edilmiştir.



Şekil 5.15 Çekme koparma deneyi sonrasında piyon kopma yüzeyleri.

Tablo 5.5 Kohezif kopma yüzeyi oranı veya kopmanın gerçekleştiği kesit.

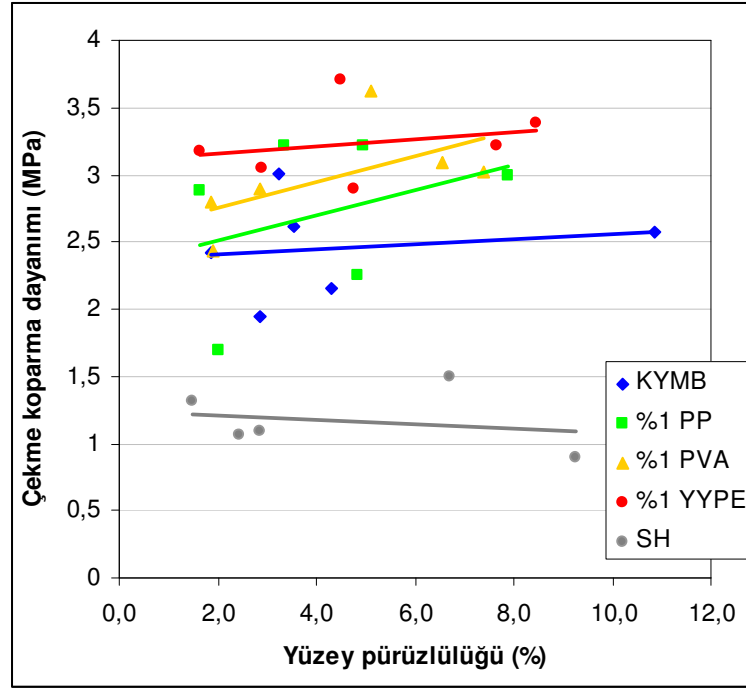
Kohezif kopma yüzeyi oranı veya kopmanın gerçekleştiği kesit		Yüzeye uygulanan tasarım				
Yüzey özelliği		KYMB (MB %1,2)	PP %1	PVA %1	YYPE %1	Standart harç
A	Gri pürüzsüz yüzeyli kilit taşı	%80	%90	Matris içinden	Matris içinden	%0
B	Sarı az pürüzlü kilit taşı	%35	%40	Matris içinden	Matris içinden	%0
C	Gri pürüzlü kilit taşı	Matris içinden	%90	Matris içinden	Matris içinden	-
D	Açık gri pürüzlü kilit taşı	Matris içinden	%80	%40	Matris içinden	%0
E	Gri pürüzlü kilit taşı	%30	%60	%15	Matris içinden	%0
F	Açık gri az pürüzlü kilit taşı	Matris içinden	Matris içinden	Matris içinden	Matris içinden	%0



Şekil 5.16 Kendiliğinden yerleşebilirliğin çekme koparma performansını artırıcı etkisi, a) Mikro betonların beton yüzeyindeki boşlukları doldurarak aderansı artırıcı etkileri, b) Standart harcın boşlukları doldurmadaki yetersizliği.

Çekme koparma deneyi sonuçları ile pürüzlülük ölçüm sonuçları arasındaki ilişki incelendiğinde elde edilen sonuçlar Şekil 5.17’de sunulmuştur. Tüm örnekler beton yüzeyinden kopmasa da beton yüzeyi aderansı, çekme koparma dayanımını etkileyen parametrelerden biridir. Şekil 5.17’de verilen grafikten elde edilen bulgular bir önceki paragrafta açıklanan teoriyi destekler niteliktedir. Çünkü pürüzlü örneklerde mikro betonların çekme koparma dayanımı artarken, standart harç ile hazırlanan örneklerin çekme koparma dayanımları azalmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü, lifli ve

lifsiz kendiliğinden yerleşen mikro beton için çekme koparma dayanımı açısından avantaj iken, standart harç için bir dezavantaja dönüşmektedir.



Şekil 5.17 Farklı karışımlar için çekme koparma deneyi sonuçları ile pürüzlülük ölçüm sonuçları arasındaki ilişki.

5.4.2 Liflerin Çekme Koparma Performansını Artırıcı Etkisi

Lifli mikro beton örneklerinden elde edilen çekme koparma dayanımları, lifsiz mikro beton örneklerine göre 0,5 ile 1,0 MPa daha yüksektir. Bu farklılığın nedeni, örneklerin iz açma işleminden kaynaklanmış olabilir. İz açma sırasında, liflerin izin açıldığı bölgenin tabanına doğru itilmesinin, liflerin burada birikmesine ve belki de kesitteki gerilmeyi kesit dışına da aktarmasına neden olacağı düşünülebilir. Açılan izin beton yüzeyindeki durumunu görmek için lifli örneklerin etrafındaki tabaka çekiç ve keski ile kaldırılmıştır. Bu kırma işlemi özellikle lifli örneklerde çok güç olmuştur. Çünkü lifler matrisi bir arada tutmakta ve darbenin hasar verici etkisini sönümlemektedir. Etraftaki tabaka betonu da kopararak sökülüş ve beton ile matris kesişimine kadar inilmiştir (Şekil 5.18). Burada izin açıldığı bölgenin tabanında 1-2 mm'lik kısma sıkışmış lif kümeleri gözlenmiştir. Bu liflerin gerilmeyi dış

tabakaya iletmesi söz konusu olabilir. Bu durumda liflerin çok rijit olmaması, bu derece ince bir bağlantı bölgesinde gerilmeyi ne derece aktarabilecekleri sorusunu da gündeme getirmektedir. Ancak yine de, çekme koparma dayanımında bir miktar artış meydana gelmiştir. Gözlenen bu artış liflerin gerilmeyi yaymadaki performansını bir kez daha göstermektedir.



Şekil 5.18 Liflerin çekme koparma performansını artırıcı etkisi.

5.4.3 Sonuçlar ve Değerlendirme

Daha nceki bölümlerde mekanik özellikleri ve tokluk performansları incelenen mikro beton karışımının, beton yüzeyle aderansı çekme koparma deneyleri yapılarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar lifli ve lifsiz mikro betonların çekme koparma dayanımının, standart harç örneklere kıyasla oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Bu farklılığı, kendiliğinden yerleşebilirliğin sağladığı, boşluk doldurucu etkiden kaynaklandığı yapılan deneysel çalışmalarla ortaya konulmuştur. Mikro betonlarda lif kullanımının tokluk arttırıcı etkisinin yanında dolaylı da olsa aderans arttırıcı etkisi olduğu belirlenmiştir.

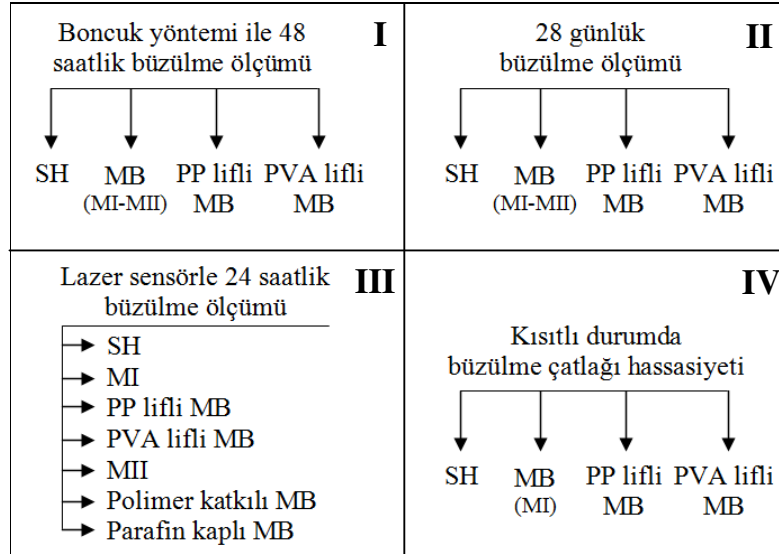
Lifsiz mikro betonun eski beton yüzeye güçlü aderansı, ince tabakalar halinde yüzeye uygulanması durumunda, tiksotropi kaynaklı sorunların büyük ölçüde ortadan kalktığını göstermiştir.

Lifli ve lifsiz mikro betonların eski betona yapışma mukavemetlerinin zaman içinde nasıl değiştii ve ortam koşullarındaki değişikliklerden ne derece etkilendiği de incelenerek, bu malzemenin tamir amaçlı olarak kullanılabilirliği sınanabilir.

BÖLÜM ALTI

MİKRO BETONUN BOYUTSAL KARARLILIĞI

Mikro beton tasarımlarında, gerek yüksek çimento dozajı kullanımı, gerekse iri agrega ve kumun olmayışı hem erken yaşlarda, hem de uzun vadede büzülme miktarını normal bir çimento harcına kıyasla önemli ölçüde arttırmaktadır. Yüksek büzülme değerleri şekil değişimlerinin engellendiği (kısıtlı) durumlarda, çatlama riskini arttıracığından boyutsal stabilite açısından istenen bir özellik değildir. Erken yaşlarda çimento esaslı kompozitlerde meydana gelen şekil değişimlerini hassas bir şekilde ölçmek ve kompozitin taze halden katı hale geçişini gözlemlemek, oldukça spesifik yöntemler gerektirmektedir. Bu bölümde tez kapsamında incelenen bazı mikro beton karışımlarının erken yaşlarda ve uzun vadede büzülme potansiyellerini ölçmeye ve karşılaştırmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalar Şekil 6.1’de verilen akış şemasında görüldüğü gibi birbirinden bağımsız dört aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, karışımın hazırlanmasından sonra 48 saatte kalıp içinde bekleyen örnekte meydana gelen büzülmenin ölçümü için yüksek çözünürlüklü dijital fotoğraflar kullanılarak, örnek üzerinde belirlenmiş noktalar arası mesafe değişimlerinin ölçülmesi yoluna gidilmiştir. Bu yöntem kullanılan ölçüm noktalarının polimer boncuklardan oluşması nedeniyle “boncuk yöntemi” olarak adlandırılmıştır. Ayrıca iki gün kalıpta bekletilen aynı örneklerin kalıptan çıkarıldıktan sonraki uzun vadeli büzülme ölçümleri klasik yöntemlerle de yapılmıştır (İkinci aşama). Üçüncü aşamada, erken yaşlarda büzülme ölçümü için ilk aşamada kullanılan yöntemin eksiklikleri ve elde edilen tecrübeler dikkate alınarak, yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Lazer sensörler kullanılarak yapılan erken yaş büzülme ölçümlerinde, zamana bağlı büzülme verileri toplanmıştır. Söz konusu yöntemin çimento harcı, çimento hamuru ve mikro beton karışımlarında uygulanabilirliği üzerine çalışmalar yapılmıştır. Son aşamada ise, lifsiz ve lifli mikro betonların kısıtlı durumda büzülme çatlağı hassasiyetleri incelenmiştir. Elde edilen bulgular ışığında, mikro betonun erken yaşlarda büzülme miktarını ve/veya çatlak hassasiyetini azaltmaya yönelik öneriler getirilmiştir.



Şekil 6.1 Erken yaşlardaki ve uzun vadeli şekil değişimi ölçümüne yönelik olarak yapılan çalışmaların akış şeması.

Çimento esaslı malzemelerin erken yaşlardaki büzülmesini etkileyen pek çok parametre bulunmaktadır. Bunlar iç parametreler (tasarımın tane boyu dağılımı, çimento dozajı, su/çimento oranı, diğer bileşenlerin miktarları vb.), dış parametreler (ortam sıcaklığı, nem durumu vb.) ve örnek şekli-deney koşulu ile ilgili parametreler (örnek kalınlığı, örneğin yüzey alanı/hacim oranı, örneğin kalıpla olan sürtünme derecesi vb.) olarak gruplandırılabilir. İç parametrelerin etkisini anlayabilmek için dış parametreler ve örnek şekli-deney koşulları ile ilgili parametreler sabit tutulmalı ya da deneylerin söz konusu parametrelerden ne derecede etkilendiği belirlenmelidir. Her deney sonucu incelendiği örnek şekli, sıcaklık ve nem koşulları dikkate alınarak yorumlanmalıdır. Bu bağlamda, I. ve II. aşama deneysel çalışmalarda farklı koşullardan elde edilen sonuçlar birbirinden bağımsız olarak düşünülmüş ve sonuçlar birbiri ile karşılaştırılmamıştır.

6.1 Erken Yaşlardaki ve Uzun Süreli Şekil Değişimi Ölçümüne Yönelik Çalışmalar (I. Aşama, Boncuk Yöntemi)

Çimento esaslı kompozitlerin erken yaşlardaki büzülme miktarlarının tespiti, literatür bölümünde de tartışıldığı üzere oldukça zor bir konudur. Kullanılacak yöntem, seçilecek örnek boyutları ve ortam koşulları ölçüm sonuçlarını

etkilemektedir. Sistem ve kalıp seçimi ile ilgili bazı ön denemeler yapılarak “*boncuk yöntemi*” geliştirilmiştir.

6.1.1 Boncuk Yöntemi ve Hazırlanan Örnekler

Boncuk yönteminde 25*25*285 mm boyutlarındaki ikili harç çubuğu kalıpları kullanılmaktadır. Kalıpların pim girişleri vidalı olmayıp, serbest büzölmeye izin verecek şekilde yapılmıştır. Böylece örnek kalıp içinde serbest olarak büzülebilmektedir. Ancak kalıp yüzeyleri ile örnek arasındaki sürtünme, büzölmeyi engelleyen bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır. Bu etkiyi azaltmak amacıyla kalıp tabanı ve çeperleri dökümden önce yağlanmıştır. Kalıplara yerleştirilen taze karışımların yüzeyleri perdelanmış ve perdel yüzeyine çapları 0,5-0,6 mm olan kırımızı renkli polimer boncuklar yerleştirilmiştir. Şekil 6.2’de boncukların yerleştirildiği bir örnek görölmektedir. Boncuklar yerleştirildikten sonra ilk görüntü alınmıştır. İki gün sonra kalıpta bekletilen örneğin yüzeyi tekrar görüntölenmiştir. Boncuklar arası mesafenin değişiminden yararlanılarak örneklerdeki büzölmelerin ölçölmesi hedeflenmiştir. Şekil 6.3’de örneklerin başlangıçtaki ve iki gün sonraki görüntüsü verilmiştir. Boncuklar arası mesafelerin hesaplanmasında boncukların merkez nokta koordinatları kullanılmıştır. Örnek yüzeyine yerleştirilen altı nokta arasındaki mesafeler kullanılarak iki farklı hesaplama yapılmıştır (Şekil 6.3). İlk hesaplamada noktalar arası tüm düşey mesafelerin ortalaması hesaplanmıştır. Bu hesaplamada kullanılan formüller 6.1-6.3’de sıralanmıştır. İkinci hesaplamada ise sadece en uzak noktalar arası mesafeler kullanılmıştır (6.4)

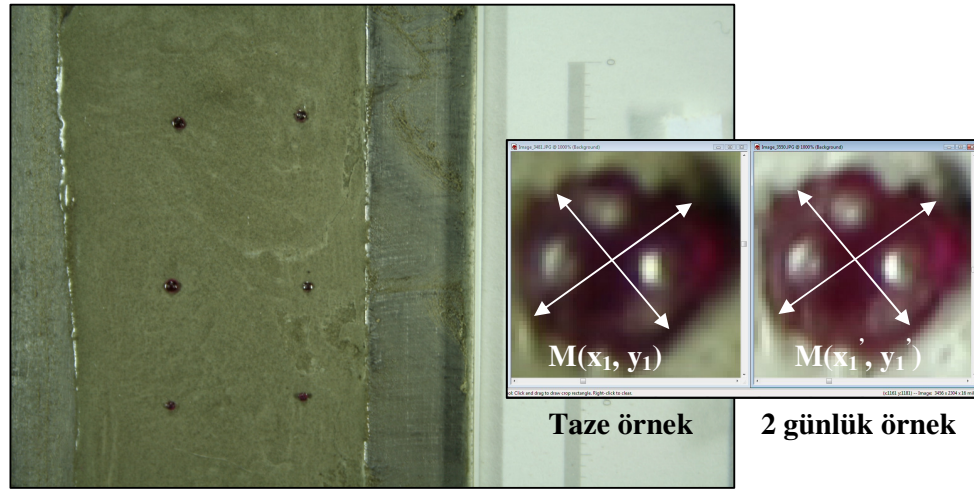
$$\begin{aligned} L_{12} &= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} & L'_{12} &= \sqrt{(x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2} \\ L_{23} &= \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2} & L'_{23} &= \sqrt{(x'_3 - x'_2)^2 + (y'_3 - y'_2)^2} \\ L_{13} &= \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2} & L'_{13} &= \sqrt{(x'_3 - x'_1)^2 + (y'_3 - y'_1)^2} \end{aligned} \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned} L_{45} &= \sqrt{(x_5 - x_4)^2 + (y_5 - y_4)^2} & L'_{45} &= \sqrt{(x'_5 - x'_4)^2 + (y'_5 - y'_4)^2} \\ L_{56} &= \sqrt{(x_6 - x_5)^2 + (y_6 - y_5)^2} & L'_{56} &= \sqrt{(x'_6 - x'_5)^2 + (y'_6 - y'_5)^2} \\ L_{46} &= \sqrt{(x_6 - x_4)^2 + (y_6 - y_4)^2} & L'_{46} &= \sqrt{(x'_6 - x'_4)^2 + (y'_6 - y'_4)^2} \end{aligned}$$

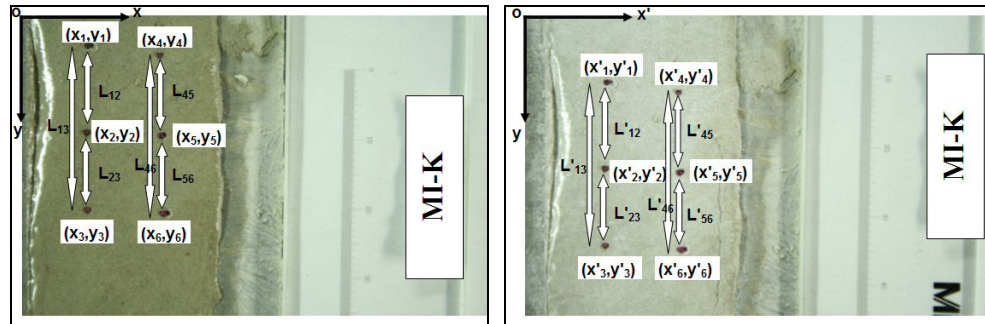
$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{12} &= \frac{L'_{12} - L_{12}}{L_{12}} & \varepsilon_{45} &= \frac{L'_{45} - L_{45}}{L_{45}} \\
 \varepsilon_{23} &= \frac{L'_{23} - L_{23}}{L_{23}} & \varepsilon_{56} &= \frac{L'_{56} - L_{56}}{L_{56}} \\
 \varepsilon_{13} &= \frac{L'_{13} - L_{13}}{L_{13}} & \varepsilon_{46} &= \frac{L'_{46} - L_{46}}{L_{46}}
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

$$\varepsilon_{\text{genel ort.}} = \frac{\varepsilon_{12} + \varepsilon_{23} + \varepsilon_{13} + \varepsilon_{45} + \varepsilon_{56} + \varepsilon_{46}}{6} \tag{6.3}$$

$$\varepsilon_{\text{uzunboy ort.}} = \frac{\varepsilon_{13} + \varepsilon_{46}}{2} \tag{6.4}$$

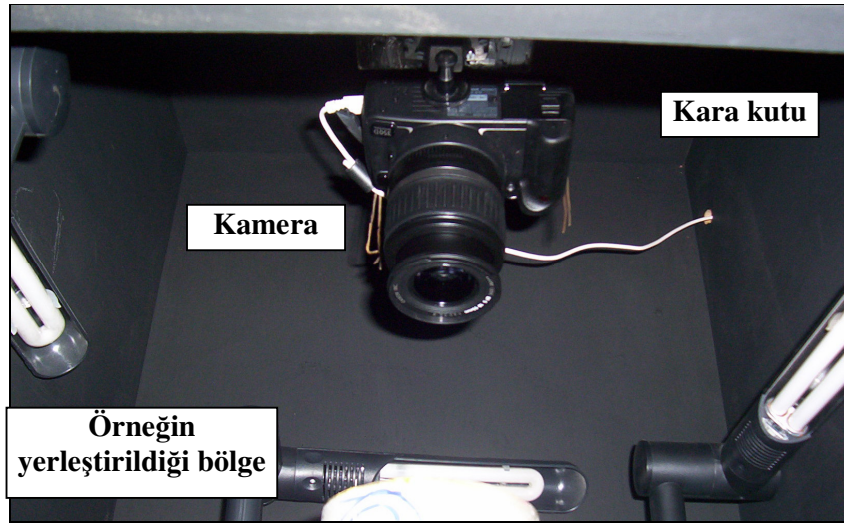


Şekil 6.2 Boncukların yerleştirildiği örnek yüzeyi ve boncukların yakından görünümü.



Şekil 6.3 Mesafe hesaplamasında kullanılan koordinat isimlendirmeleri (sol: taze örnek, sağ: iki günlük örnek).

Görüntülerin alınacağı kamera sistemi bilgisayar kontrollü olup, kapalı bir kutu içine yerleştirilmiştir. Böylece dış ortamdan ışık girişi engellenmiştir. Kameranın etrafına yerleştirilen sabit ışık kaynakları kullanılmıştır. Kameranın odak ayarı sabit tutulmuştur. Şekil 6.4’de deneysel çalışmalarda kullanılan düzenek görülmektedir. Fotoğraflar, piksel başına 24 bit derinlikte 16 milyon renk içerecek şekilde çekilmiştir. Tüm fotoğraf çekimlerinde kalibrasyon amaçlı Mitutoyo mikro cetvel fotoğraf içine yerleştirilmiştir.



Şekil 6.4 Fotoğraf çekimlerinde kullanılan kamera sistemi.

İki farklı matris (MI ve MII) ve iki farklı lif (PP ve PVA) kullanılarak altı mikro beton karışımı hazırlanmıştır. Ayrıca karşılaştırma amacıyla standart harç karışımı da üretilmiştir. Tablo 6.1’de listelenen karışımlar prizmatik kalıplara yerleştirilmiştir. Tablodan görüleceği üzere, ilk iki set 25-30°C’de ve %45-50 BN (Bağıl Nem) aralığında, diğer iki set ise 20-25°C’de ve %50-60 BN aralığında bekletilmiştir. Deney aynı karışımlar kullanılarak dört kez tekrarlanmıştır. İkinci gün kalıptan sökülen serilerin 28 güne kadar olan büzölmeleri de uçlarındaki pimlerle komparatör yardımıyla ölçölmeye devam edilmiştir. Ancak bir deneyde boncuklar örneklere batırılmamıştır. Bu seride sadece 2-28. gün arasındaki sertleşmiş harç ölçömleri alınmıştır.

Tablo 6.1 Büzülme deneyleri için hazırlanan örnekler ve ilk iki günlük bekleme koşulları.

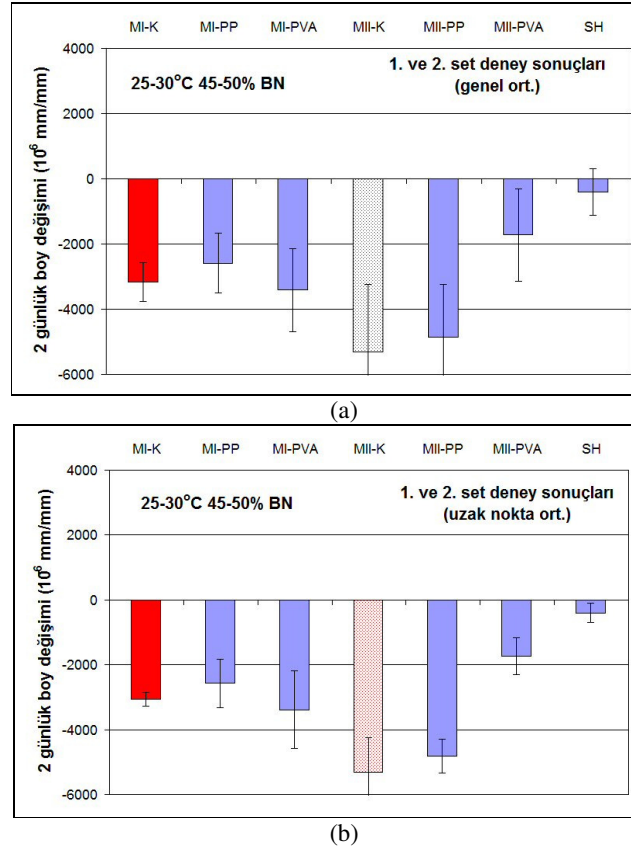
Kod	1. set (25-30°C, %45-50 BN)	2. set (25-30°C, %45-50 BN)	3. set (20-25°C, %50-60 BN)	4. set (20-25°C, %50-60 BN)
SH	2 prizma + boncuk uygulaması	2 prizma + boncuk uygulaması	2 prizma	2 prizma + boncuk uygulaması
MIK	2 prizma + boncuk uygulaması	2 prizma + boncuk uygulaması	2 prizma	2 prizma + boncuk uygulaması
MIPP	2 prizma + boncuk uygulaması	2 prizma + boncuk uygulaması	2 prizma	2 prizma + boncuk uygulaması
MIPVA	2 prizma + boncuk uygulaması	2 prizma + boncuk uygulaması	2 prizma	2 prizma + boncuk uygulaması
MIİK	2 prizma + boncuk uygulaması	2 prizma + boncuk uygulaması	2 prizma	2 prizma + boncuk uygulaması
MIIPP	2 prizma + boncuk uygulaması	2 prizma + boncuk uygulaması	2 prizma	2 prizma + boncuk uygulaması
MIIPVA	2 prizma + boncuk uygulaması	2 prizma + boncuk uygulaması	2 prizma	2 prizma + boncuk uygulaması

6.1.2 Boncuk Yöntemi Ölçüm Sonuçları ve Değerlendirme

Şekil 6.5’de ilk iki set ölçümlerden elde edilen, iki günlük büzülme ölçümü sonuçları verilmiştir. İlk iki seri birbirine yakın zamanlarda döküldüğü için, benzer ortam koşullarına maruz kalmış olup, bu setlerin ortalamaları ile çalışılmıştır. Sonuçlar tüm noktalar arası mesafeler ve sadece uzak noktalar arası mesafeler kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmış ve sırasıyla Şekil 6.5a ve 6.5b’de verilmiştir. Standart sapma değerleri kadar hata çubukları sütun grafikler üzerine işlenmiştir. Yapılan ölçümlerde kullanılan boncuklar arası mesafe arttıkça ortalama değerlerin fazla değişmediği, ancak standart sapma değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Bu durum boncuklar arası mesafenin fazla olmasının ölçümlerin hassasiyeti açısından önemli olduğunu göstermektedir.

Genel olarak mikro betonların 48 saatlik büzülme değerleri, 25-30°C sıcaklık ve %45-50 BN koşulunda, standart harca kıyasla çok daha fazladır (Şekil 6.5). Standart harcın birim büzülmesi yaklaşık 300×10^{-6} iken, mikro betonlarda birim büzülme $3000-4000 \times 10^{-6}$ mertebelerine ulaşmaktadır. Lif ilavesinin serbest büzülmeyi uçucu küllü matrislerde bir miktar azalttığı, diğer matrislerde ise belirgin olarak etkilemediği görülmüştür. Ancak hiçbir zaman lif ilavesi erken yaşlardaki büzülmeyi standart harç seviyesine indirememiştir. Örneklerin yüzeylerinden yapılan ölçümlerle

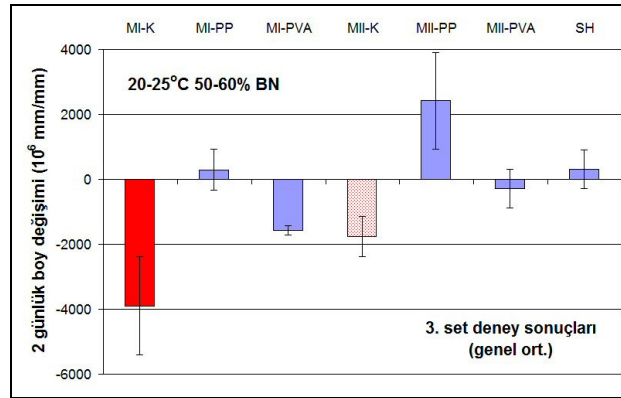
elde edilen sonuçlar, olumsuz ortam koşullarında mikro beton yüzeyinin, standart harçtan yaklaşık 10 kat daha fazla büzüldüğünü göstermiştir. Meydana gelen büzülme, örneklerin kalıp içinde beklediği sürede, kalıpla uçları arasında gözle görülür açılma olmasıyla da tespit edilmiştir.



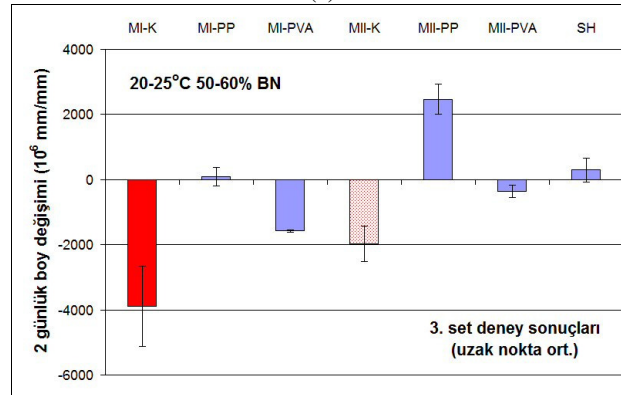
Şekil 6.5 İlk iki set kullanılarak yapılan büzülme ölçümü sonuçları.

Mikro betonların 48 saatlik büzülme değerlerinin 20-25°C sıcaklık ve %50-60 BN koşulunda incelendiği üçüncü sette ise, serbest büzülme değerlerinin lif kullanımı ile azaldığı gözlenmiştir (Şekil 6.6). Standart sapma değerlerinde, boncuklar arası mesafe arttıkça azalma durumu bu seride de söz konusudur. Elde edilen bu bulgu, belli bir nem ve sıcaklık koşuluna kadar, erken yaş büzülmesinin lif ilavesi ile azaltılabileceğini, ancak daha sıcak ve kuru havalarda lifin büzülmeyi engelleyici etkisinin olmadığı izlenimini yaratmaktadır. Ancak burada örneklerin bazılarında genleşme ölçülmesi beklenmeyen bir sonuçtur. Üçüncü sette incelenen örneklerde iki günlük sürede örneklerin kalıp içinde uçlarındaki hareketler takip edildiğinde lifli

örneklerin büzülmeyip, lifsiz örneklerin büzüldüğü gözlenmiştir. Bu durum Şekil 6.7’de toplu olarak fotoğraflandırılmıştır. Kontrol örneklerinin uç kısımlarında büzülme nedeniyle hareketten kaynaklanan açılmalar gözlenirken, lifli örneklerde herhangi bir açılma söz konusu değildir. Bu durumun nedeni liflerin perdelama sırasında yanlardaki metal kalıp yüzeylerine tutunması ve lifli örneklerin büzülmesini engellemesi olabilir. Lifsiz mikro betonda böyle bir etki olmadığından büzülmeye devam etmiştir. Olumsuz koşulların etki ettiği ilk iki sette ise, perdelama sırasında yanlara yapışan lifler, büzülme etkisi çok şiddetli olduğu için kalıptan kurtulmuş ve önemli derecede büzülmüştür. Aslında söz konusu bulgu lifli mikro betonların kısıtlı durumda büzülmeyi engelleyici işlev görebilecekleri yönünde ipuçları vermektedir. Yapılan incelemelerden elde edilen sonuçlar, lifli mikro betonun büzülme potansiyelini yüzeyden ölçmede bazı sorunların olduğunu göstermiştir. Bu problemleri çözmeye yönelik olarak, başka alternatif deneylerle tüm kesitteki büzülmenin ölçülmesi gündeme gelmiş olup, bir sonraki bölümde bu konuda yapılan çalışmalar sunulacaktır.

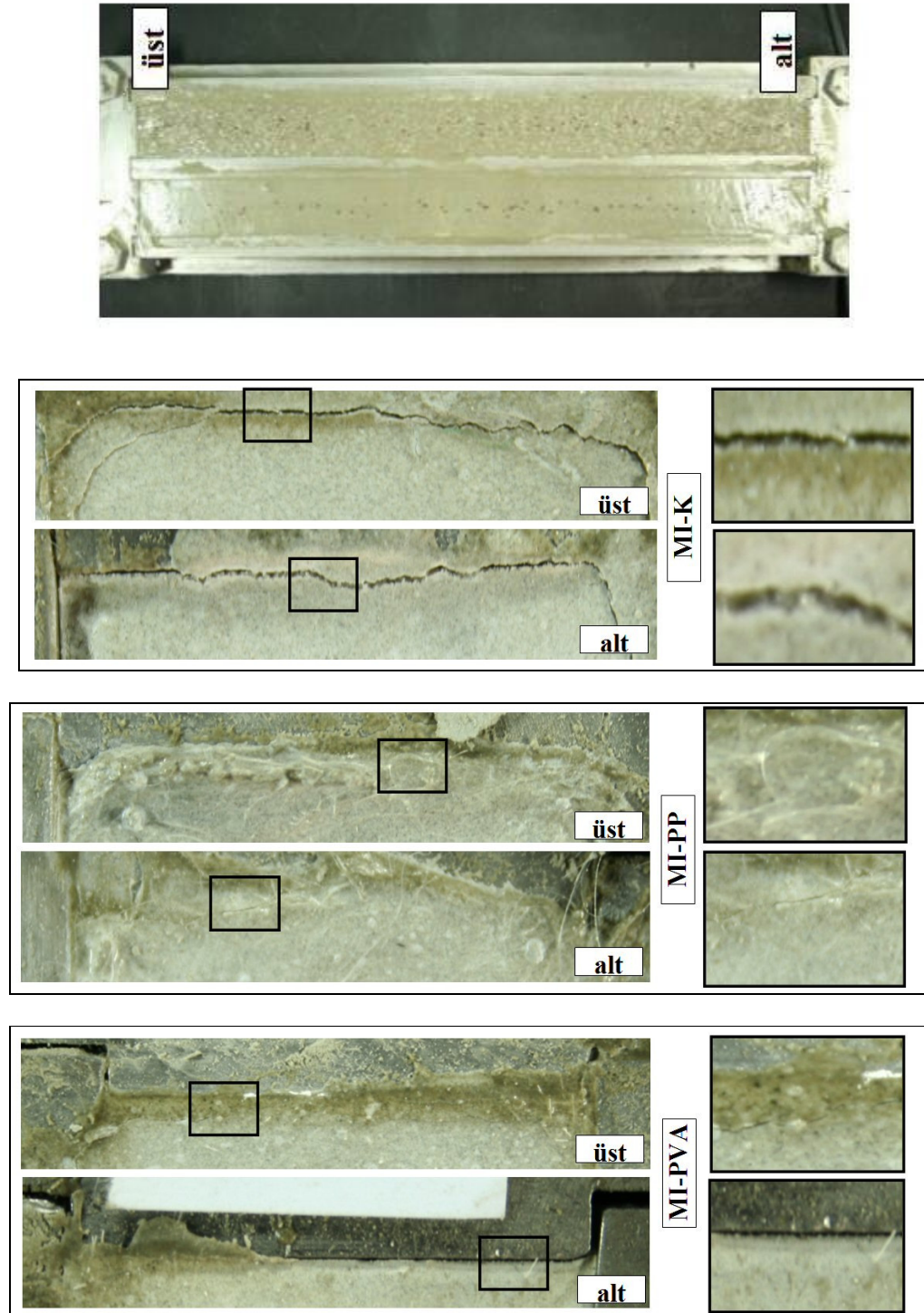


(a)

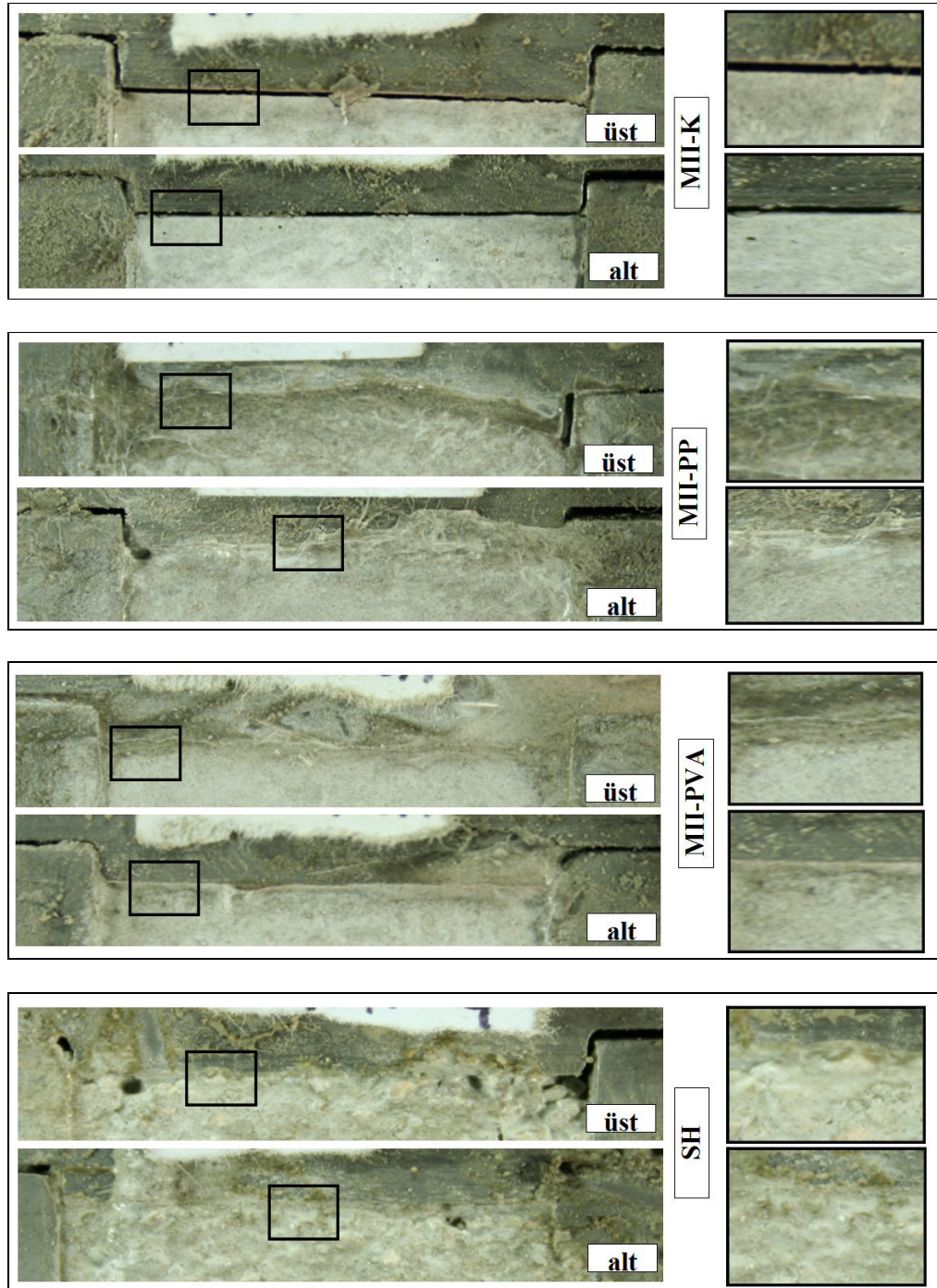


(b)

Şekil 6.6 Üçüncü set kullanılarak yapılan büzülme ölçümü sonuçları.



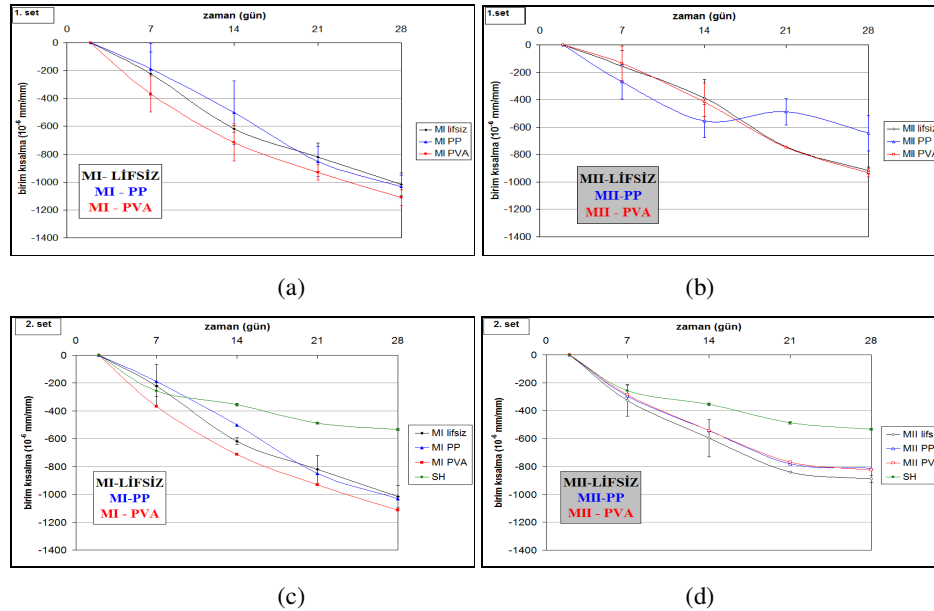
Şekil 6.7 Üçüncü set örneklerinin uç kısım fotoğrafları (MI-K, MIPP, MIPVA).



Şekil 6.7 Üçüncü set örneklerinin uç kısım fotoğrafları (MIIK, MIIPP, MIIPVA, SH).

6.1.3 Uzun Süreli Kuruma Büzülmesi Ölçüm Sonuçları ve Değerlendirme

İlk iki gün kalıpta tutulan örnekler daha sonra kalıptan çıkartılmıştır. Örneklerin haftalık boy ölçümleri devam ettirilmiştir. Bu aşamada örnekler laboratuvar ortamında bekletilmiş; günlük sıcaklık ve nem değerleri kaydedilmiştir. Bir aylık periyotta sıcaklık $24\pm3^{\circ}\text{C}$, bağıl nem değeri ise %35-75 arasında değişmiştir. Birinci sette hazırlanan standart harç kırıldığından ölçüm alınamamıştır. Ancak mikro betonların büzülme değerleri kendi içinde karşılaştırıldığında, sertleştikten sonra büzülmenin uçucu küllü serilerde daha az olduğu görülmüştür (Şekil 6.8). Uçucu küllü serilerde uzun vadede serbest kirecin genleştirici etkisi büzülmeyi bir miktar azaltmış olabilir. Lifin kuruma büzülmesine etkisi belirgin değildir. İkinci seride de benzer bir durum söz konusudur. Ayrıca, bu seride standart harcın büzülme değerinin de, mikro betonlardan yaklaşık yarı yarıya daha az olduğu belirlenmiştir. Büzülme deneylerinin sonuçları, incelenen koşullarda mikro betonların serbest büzülme hassasiyetinin lif kullanımı ile tamamen yok edilemeyeceğini göstermiştir. Yaklaşık bir aylık sürede lifli mikro beton da en az lifsiz kadar büzülmemektedir. Ancak bu sürede dayanımın artması, çatlak riskini azalmaktadır.



Şekil 6.8 Uzun süreli serbest büzülme ölçümü sonuçları.

6.1.4 Sonuçlar, Genel Değerlendirme ve neriler

Boncuk yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalardan ve uzun vadeli büzülme ölçümlerinden elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Gerek standart harç, gerekse lifsiz mikro beton için boncuk yöntemi ile yapılan ölçümler yüzeysel büzülmenin ölçümünde boncuk yönteminin kullanılabileceğini göstermektedir. Ancak bu yöntem ile yüzeysel ölçüm yapıldığı için kesitte meydana gelen serbest büzülme ölçülememektedir.

- Boncukların merkezlerinin tespitinde, örneklerde iki günlük sürede meydana gelen oturma nedeniyle kayma meydana gelebilmektedir. Bu durum boncuklar arası mesafe değişiminin farklı noktalardaki ölçümünde değişkenlik yaratmaktadır. Boncuklar arası mesafe arttıkça söz konusu değişkenliğin azaldığı tespit edilmiştir. Boncuk yönteminde, boncuklar yerleştirilirken noktalar arası mesafe, fotoğraf alanının izin verdiği ölçüde uzun seçilmelidir.

- Lifli mikro betonların serbest büzülme değerlerinin ölçümünde boncuk yöntemi çelişkili sonuçlar vermiştir. Farklı ortam koşullarında gerçekleştirilen ölçüm sonuçları, liflerin düşük nem ve yüksek sıcaklık koşullarında etkisiz, göreceli olarak yüksek nem koşullarında ise, yüzeysel büzülmeyi engellemede etkili oldukları izlenimini vermektedir. Ancak rnekler üzerinde yapılan gözlemler, lifli örneklerin perdahlanması sırasında yan kalıplara tutunan liflerin, yüzeysel büzülmeyi engellemede etkili oldukları sonucunu ortaya koymaktadır. Olumsuz koşullarda incelenen örneklerde, şiddetli büzülme etkisi ile kalıp yüzeyine yapışan lifler kurtulmakta ve büzülme, lifli örneklerde de gerçekleşmektedir.

- Boncuk yöntemi ile incelenen örneklerin sadece ilk ve 48 saat sonraki yüzey fotoğrafları çekilerek ölçümler yapılmıştır. Zira yedi farklı örneğin aynı koşullarda performansının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Tek bir örneğin zamana bağlı büzülme gelişimi de belli periyotlarda fotoğraf çekimi ile takip edilebilir.

- Boncuk yöntemi geliştirilmeye açık bir yöntemdir. Yüzeysel şekil değişimi ölçümü mikroskop kameralı video ekstansometreler yardımıyla yapılırsa daha hassas ölçümler almak mümkün olacaktır.

- Uzun vadeli büzülme ölçümleri sonucu, lifsiz ve lifli mikro betonların büzülme potansiyelleri güvenilir olarak saptanmıştır. İlk iki gündeki büzülmenin dikkate alınmadığı ölçümlerde, mikro betonların birim büzülme değerlerinin $800-1200 \cdot 10^{-6}$ aralığında olduğu tespit edilmiştir. Standart harç örnekleri aynı ortam koşullarında yaklaşık $500 \cdot 10^{-6}$ 'lık birim büzülme değeri vermiştir.

- Büzülme deneylerinin sonuçları mikro betonların incelenen koşullarda serbest büzülme hassasiyetinin lif kullanımı ile tamamen yok edilemeyeceğini göstermiştir. Uzun vadede lifli mikro beton da en az lifsiz kadar büzülmeaktadır.

6.2 Erken Yaşlardaki Şekil Değişimini Lazer Sensörlerle Ölçmeye Yönelik Çalışmalar (II. Aşama)

Bu bölümde mikro beton karışımlarının erken yaş boyutsal kararlılığını inceleme amacıyla geliştirilen ikinci bir yöntem sunulacaktır. Bir önceki bölümde belirlenen erken yaş büzülme problemi, özellikle lifsiz mikro betonlar için önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak erken yaşlardaki büzülmeyi ölçmenin güçlüğü ve mevcut deney yöntemlerinin yetersizliği alternatif yöntemlerin gerekliliğini gündeme getirmektedir (Qi ve diğer., 2002, Pease 2005). Boncuk yöntemi böyle bir amaçla geliştirilmiştir. Ancak geliştirilen bu yöntemin bir önceki bölümde yapılan incelemeler sonucunda bazı dezavantajları saptanmıştır.

II. aşamada ilk olarak kullanılan malzemeler ve karışımlar tanıtılmıştır. Ardından taze örneğe temas ederek ölçüm yapan komparatör türü aygıtlar incelenmiştir. Bunlardan sonuç alınamayınca, örneğe dokunmadan ölçüm yapan lazer ölçüm sistemlerine odaklanılmıştır. Öncelikle yöntemin nasıl tasarlandığı, çalışma prensibi açıklanacak, daha sonra standart harç, çimento hamuru ve mikro beton için yöntemin uygulama ayrıntıları sunulacaktır.

6.2.1 Mikro Beton ve Standart Harçların Hazırlanmasında Kullanılan Malzemeler

Mikro betonların üretiminde CEM I 42,5R tipi Portland çimentosu, mikro agrega olarak 100 mikron altına öğütülmüş kalsit, Soma B termik santralinden alınan C tipi uçucu kül, polikarboksilat esaslı bir akışkanlaştırıcı, polipropilen (PP) ve polivinil alkol (PVA) kökenli lifler kullanılmıştır. Bu malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri bir önceki bölümde sunulmuştur. Mikro betonların yanı sıra, karşılaştırma amaçlı olarak harç yapımında standart kum kullanılmıştır. Ayrıca mikro betonun erken yaşlarda büzülme hassasiyetini azaltabilmek amacıyla, etilen vinil asetat (EVA) kökenli polimer katkısı kullanılmış olup bu malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri ilgili bölümde sunulacaktır.

6.2.2 Mikro Beton Tasarımları ve Karışımların Hazırlanması

Bu bölümde incelenen mikro beton tasarımları ve karışım bileşenleri Tablo 6.2’de verilmiştir. Ağırlıklı olarak daha önceki bölümlerde kullanılan mikro beton tasarımları incelenmiştir.

Tablo 6.2 Lazer sensörlü ölçümlerde incelenen tasarımlar ve kodları.

Karışım	Kodu	Karışım bileşenleri (ağırlıkça oranlar)					Akışkanlaştırıcı (çim. ağırlığının %’si)	Lif (% toplam hacimce)
		Çimento	Standart kum	Kireçtaşı tozu	Uçucu kül	Su		
Standart harç	SH	1	3	-	-	0,5	-	-
Mikro beton I	MIK	1	-	1	-	0,44	1,2	-
PP lifli mikro beton I	MIPP	1	-	1	-	0,44	1,2	1
PVA lifli mikro beton I	MIPVA	1	-	1	-	0,44	1,2	1
Mikro beton II	MIIK	0,5	-	1	0,5	0,53	1,3	-

* EVA içeren karışımın bileşenleri MIK ile aynıdır.

6.2.3 Taze Örneğe Temas Ederek Ölçüm Yapan Düşük Yay Kuvvetli Komparatör Deneyleri

Düşük yay kuvvetli komparatörlerin erken yaş büzülme ölçümünde kullanılabileceği düşünülerek, bu özellikte iki komparatör (yay kuvveti 0,4 N) Mitutoyo Digimatic 543-254B - low measuring force type) temin edilmiştir (Şekil 6.9). Bu komparatörler manyetik sabitleştiriciler yardımı ile aksenal olarak taze örnek enkesit merkezine Şekil 6.10'da görüldüğü gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 6.9 Mitutoyo Digimatic 543-254B tipi komparatör.



Şekil 6.10 Aksenal olarak taze örnek enkesit merkezine sabitlenen komparatörler.

İki komparatör kullanılarak örneğin uçlarının ne kadar hareket ettiği, belirli süreler arasında gözle okuma ile belirlenmiştir. Bu aygıtların ölçüm alabilmesi için komparatör ucunun temas ettiği yüzeyin belli bir rijitlikte olması gerekliliği vardır. Yapılan denemelerde komparatör ucunun yay kuvveti ne kadar düşük olursa olsun,

taze örneğin yüzeyinde bir çukur açtığı ve ölçümde fazladan büzülme okumaya neden olduğu görülmüştür. Taze örneklerin ölçüm yüzeylerine döküm sırasında yerleştirilen plastik plakalarla, komparatör ucunun örneğe batması gerilmeyi yayarak engellenmeye çalışılmıştır. Ancak bu sefer de zaman zaman plastik örneğe yapışmamakta, örnekten kurtularak ölçüm değerlerini değiştirmektedir. Ayrıca verilerin gözle okuma yoluyla kaydedilmesi 24 saat sürekli veri alınmasını engellemekte, gece veri kaydını olanaksız kılmaktadır. Diğer taraftan komparatörlerin eksenel olarak birbiri karşısına hizalanması iki komparatörle yalnızca bir örneğin incelenmesine imkân sağlamaktadır. Yukarıda sıralanan sorunlar nedeniyle taze örneklerde komparatör ile sağlıklı ölçüm alınamayacağı belirlenmiş ve bu yöntemden vazgeçilmiştir.

Yapılan denemelerde örneğin kalıp uçlarının ne zaman açılacağı, kalıp sisteminin yüzey özellikleri (yüzey pürüzlülüğü), sıcaklık ve nem durumu gibi pek çok faktörün erken yaş büzülme ölçümlerini önemli derecede etkileyebileceği de belirlenmiştir. Tüm bu tecrübeler ışığında sistemde Şekil 6.11’de listelenen değişiklikler yapılmıştır.

Tespit edilen dezavantajlar ve çözüm önerileri:	
- Rijitleşmemiş (semi-solid) örneğe batma riski	→ Lazer sensör kullanımı
- Zamana bağlı veri toplanamaması	→ Veri kayıt sistemi kullanımı
- İki komparatörün tam eksenel yerleştirilmesi ve sabitlenmesinin güçlüğü	→ Sabitleyici çerçeve ve yarı-ankastre kalıp sistemi kullanımı
- Kalıp tabanı ve yanlarının örneğe yapışması nedeniyle oluşan sürtünme ve büzülmenin kısıtlanması (yağlama ile azaltılıyor ama sıfırlanamaz)	→ Tabanda ve yan yüzeylerde sürtünmeyi azaltıcı kaygan plastik kullanımı
- Sıcaklık ve nem takibi	→ Sıcaklık ve sensörleri kullanımı

Şekil 6.11 Dokunarak ölçüm yapan sistemde tespit edilen dezavantajlar ve çözüm önerileri.

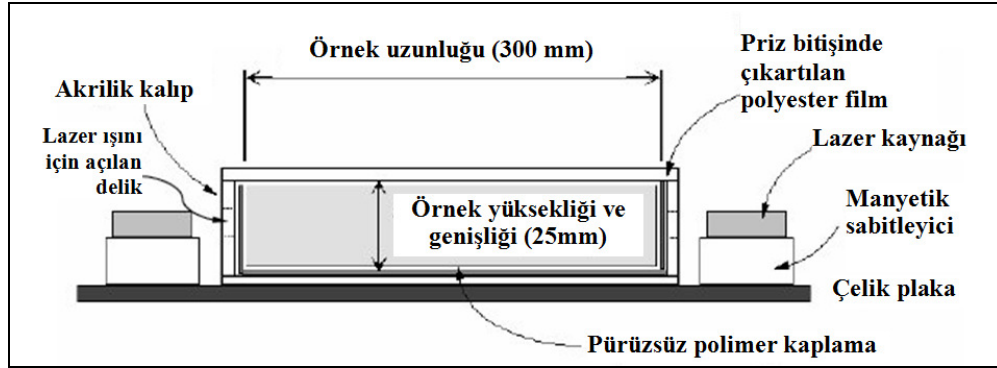
6.2.4 Taze Örneğe Temas Etmeden Ölçüm Yapan Lazer Sensörlerin Kullanımı

Bu bölümde öncelikle, taze örneğe temas etmeden ölçüm yapan lazer sensör sistemleri ile ilgili literatür özeti sunulacaktır (Qi ve diğer., 2002, Pease, 2005). Ardından tez kapsamında kullanılan yöntem tanıtılacak, farklı malzemelerle yapılan

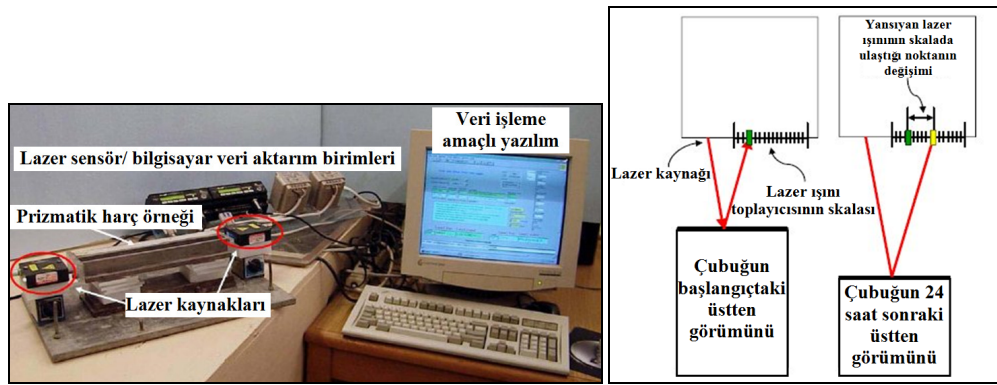
deney sonuçları (standart harç, mikro beton, lifli mikro betonlar, uçucu küllü mikro beton, ve polimer katkılı mikro beton) sunulacaktır.

6.2.4.1 Literatürdeki Mevcut Yöntemlerin Çalışma Prensipleri

Taze harçların erken yaşlarda büzülme potansiyeli genellikle dilatometrik yöntemler veya komparatörler kullanılarak belirlenmeye çalışılmaktadır (Hammer ve Bjondeguard, 2006, Koenders, Schlangen ve Leegwater, 2006, Mokarem ve diğer., 2008, Lura, Durand ve Jensen, 2006, Esping, 2006, Pane ve Hansen, 2008, Braam ve diğer., 2006, Igarashi ve Watanabe, 2006). Ancak bu yöntemlerin de kendi içinde bazı dezavantajları vardır. En önemlisi, ölçümlerin örneğe temas edilerek yapılmasıdır. Taze haldeki harca temas, halen yumuşak olan örneğe zarar vermekte ve ölçülen büzülme değerlerinin gerçek durumdan daha yüksek çıkmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, ilk 24 saatte harç henüz taze iken, temas olmaksızın ölçüm alınabilmesi için hassas lazer mesafe ölçerler ile oluşturulmuş bir ölçüm sistemine ihtiyaç bulunmaktadır. Pease (2005), tarafından lazer sensörler kullanılarak geliştirilen deney düzeneği Şekil 6.12a ve 6.12b’de görülmektedir. Sistem iki adet lazer sensörün birbirine paralel olarak örnek enkesit yüzeyine bakacak şekilde sabitlenmesi ile hazırlanmıştır. Örnek uç kalıpları delik olup, kalıp deliklerinden taze harcın çıkmaması için uçlara polyester film plakalar yerleştirilmiştir. Hazırlanan karışımlar 25*25*300 mm’lik kalıp içine dökülmekte ve lazer sensörler yardımı ile veri kayıt sistemine boy değişimi verileri aktarılmaktadır. Harç prizini aldığı anda polyester filmler üstten çekilmekte ve polyester film kalınlığı önceki ölçüm verilerinden düşülmektedir. Pease (2005), geliştirdiği sistemi kullanarak S/Ç oranı 0,3 ve 0,5 olan iki harç karışımının 24 saatlik şekil değişimlerini Şekil 6.13’deki gibi ölçmüştür. Lazer sensörlerin örneğin boyu değişikçe veriyi nasıl topladıkları Şekil 6.12c’de kısaca şematize edilmiştir. Bu konuda daha ayrıntılı bilgi ilerleyen aşamalarda sunulacaktır.



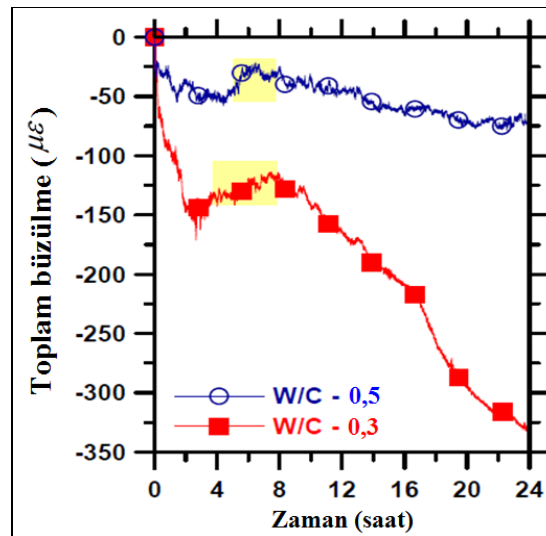
(a)



(b)

(c)

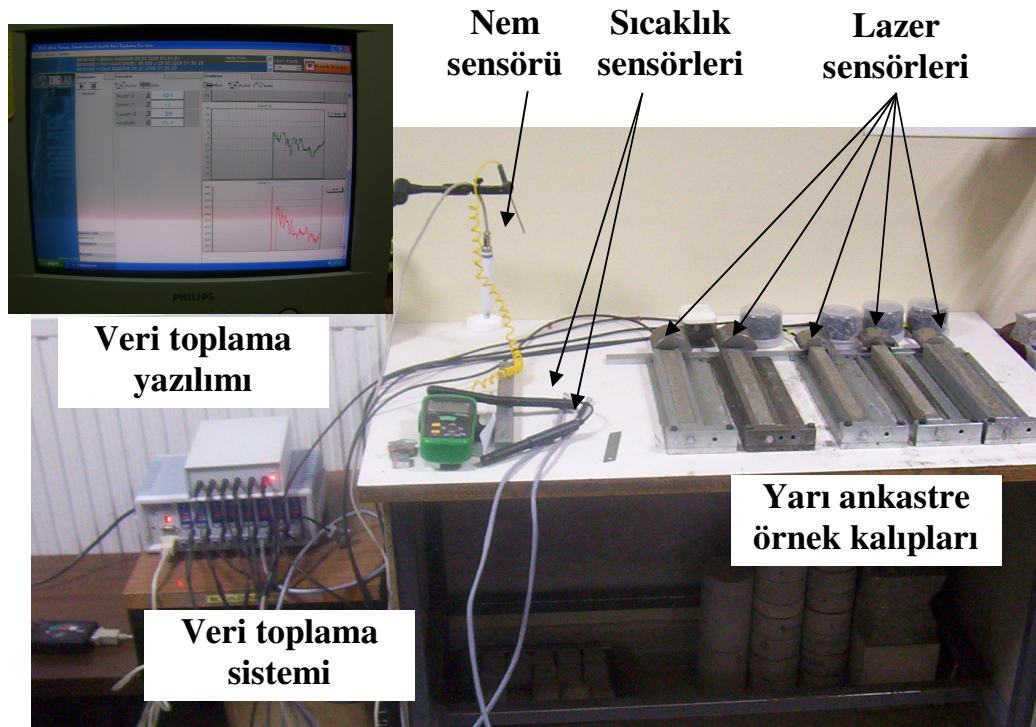
Şekil 6.12 Pease (2005) tarafından kullanılan erken yaş büzülme ölçüm sistemi, a) Sistemin şeması, b) Kurulu sistemin fotoğrafı, c) Sensörlerin çalışma prensibi.



Şekil 6.13 S/Ç oranı 0,3 ve 0,5 olan harç örneklerinin Pease (2005) tarafından kullanılan sistemle ölçülmüş 24 saatlik büzülme değerleri.

6.2.4.2 Geliştirilen Yöntem ve Mevcut Yöntemlerden Farklılıkları

Öncelikle sistem kurulumu hakkında bilgi verilecektir. Sistem beş adet standart harç kalıbı, beş adet BAUMER marka (OADM 12U6430/S35A) lazer mesafe ölçüm sensörü, iki adet sıcaklık ölçüm sensörü, bir adet bağıl nem sensörü, 8 adet sensör kablosu, 8 kanallı veri toplama sistemi (TDG-Aygıtgeçidi-USB) ve yazılım (TDGLab-S)'dan oluşmaktadır (Şekil 6.14). Deneyler laboratuvar içinde sıcaklık kontrollü klimalı bir odada gerçekleştirilmiştir.

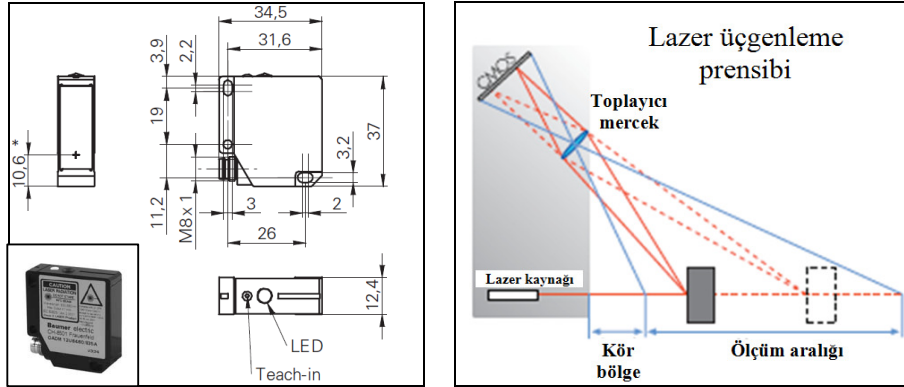


Şekil 6.14 Tez kapsamında kullanılan lazer mesafe ölçüm sistemi.

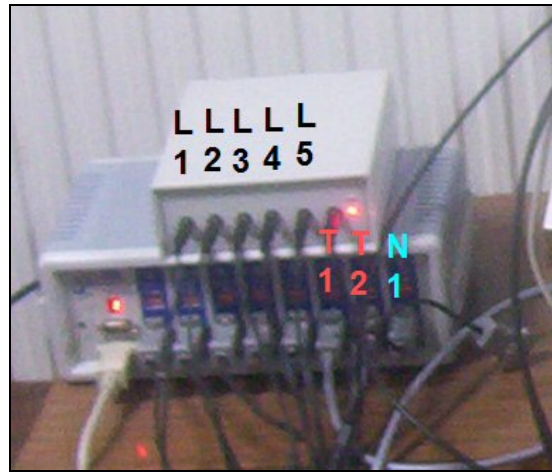
6.2.4.3 Sensörlerin Yazılıma Tanıtımı ve Kalibrasyonları

Sensörlerin yazılıma tanıtımı ve kalibrasyonlarına geçmeden önce lazer sensörlerin genel çalışma prensibinin açıklanması gerekmektedir. Şekil 6.15'de sensörlerin özellikleri ve ölçüm prensibi şematize edilmiştir. Örneğin boyunda zamanla meydana gelen kısalma, lazer kaynağından çıkan ışının toplayıcıya (CMOS) dönüş açısındaki değişim ile hesaplanmaktadır. Her lazer sensörünün ölçebileceği belli bir mesafe limiti ve kör bölgesi vardır. Lazer sensörlerin hassasiyeti bu limitleri

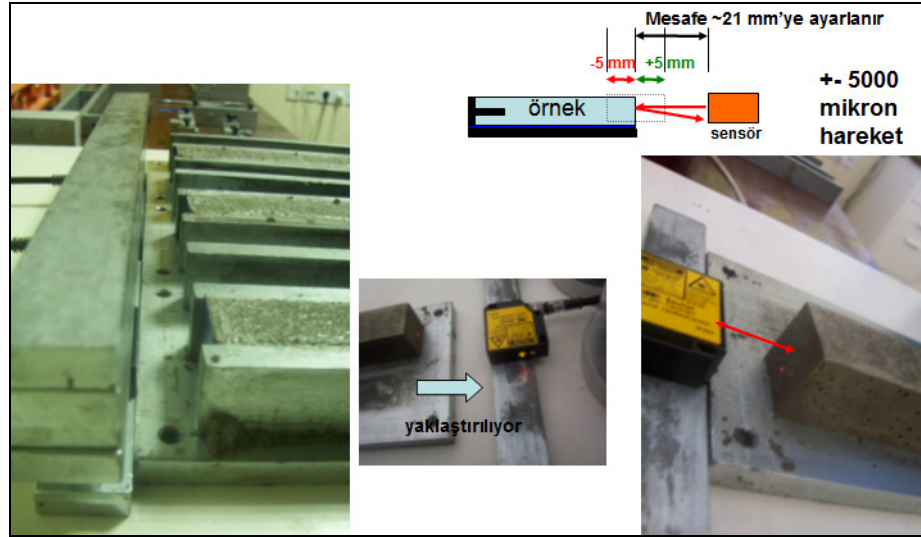
etkilemekte, mesafe limiti fazla olan ve hassasiyeti yüksek olan lazer sensörlerin fiyatları çok daha yüksektir. Bu çalışmada kullanılan BAUMER marka (OADM 12U6430/S35A) lazer mesafe ölçüm sensörlerinin çalışma limitleri 10 mm (10000 mikron) olup, sensörün ışın çıkış yüzeyinden 16 mm uzaklıktan itibaren veri toplayabilmektedir. Kalibrasyon için ilk 5 kanal lazer sensörlere, 6. ve 7. kanal sıcaklık sensörlerine, son kanal da nem sensörüne ayrılmıştır (Şekil 6.16) . Örnek yüzeyi ile lazer sensör yüzeyi arası mesafenin 21 mm olduğu nokta, programa sıfır noktası olarak tanıtılmıştır (Şekil 6.17). Böylece lazer sensörlerinin sıfır noktası yaklaşık olarak ± 5000 mikronluk bir boy değişimini ölçebilecek şekilde kalibre edilmiştir. Lazer sensörlerin çözünürlüğü 5 mikron olup, yazılım yardımıyla boy değişimi verileri 1 dakikalık aralıklarla 24 saat boyunca kaydedilmiştir.



Şekil 6.15 Sensörlerin boyut özellikleri ve çalışma prensibi.



Şekil 6.16 Mesafe ölçüm, sıcaklık ve nem sensörlerinin sekiz kanallı veri toplama sistemine bağlantıları.



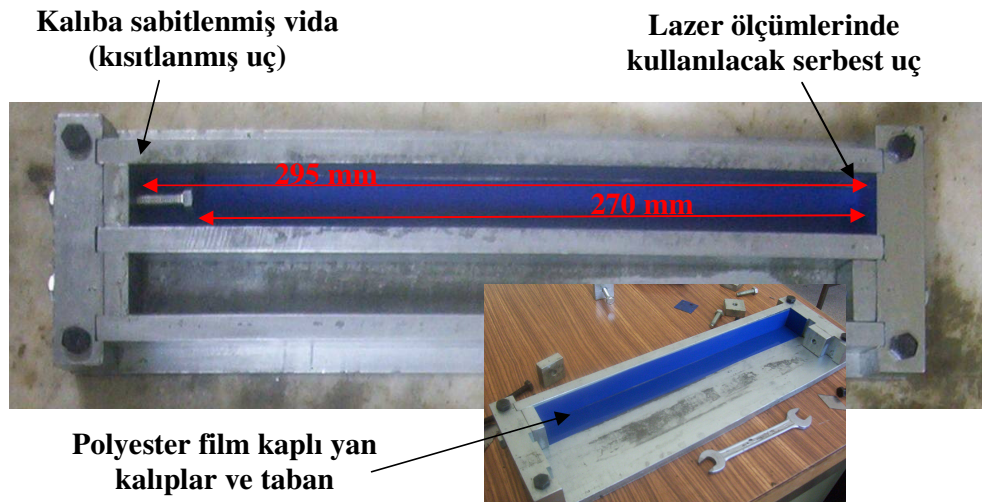
Şekil 6.17 Lazer sensörlerin kalibrasyonunda sıfır noktasının tanıtımı (sensörler ± 5000 mikronluk hareketi algılayacak şekilde konumlandırılmıştır).

6.2.4.4 Kalıp Sistemi

Pease (2005)'in kullandığı sistemde kalıp içindeki örnekte meydana gelen boy değişimi iki ucundan da ölçülmüştür. Bu çalışmada farklı olarak boy değişimi örneğin tek tarafından ölçülmüştür. Bir tarafı serbest kalacak şekilde kalıplanan örneğin diğer tarafı, taze harcın içine gömülü ve kalıba sabitlenmiş vida yardımıyla “yarı ankastre” hale getirilmiştir (Şekil 6.18). Kalıbın tüm iç yüzeyleri polyester film tabakası ile kaplanmış ve yağlanmış. Sürtünmeyi azaltıcı bu çabalarla ve uç sabitlenmesi ile örneğin tek taraflı olarak vidalı kısma doğru büzüleceği kabul edilmiştir. Şekil 6.19’da ölçümü yapılmakta olan yarı ankastre kalıplanmış örnekler görülmektedir.

Pease (2005), kalıp içinde ölçümlere karışımlar hazırlandıktan hemen sonra başlamaktadır. Uç kalıp et kalınlığının az olması nedeniyle, lazer sensörünün ışınının polyester film plakaya ulaşıp geri yansımaları mümkündür. Ancak mevcut kalıplarımızın et kalınlığının fazla olması ışının çıkışını engellemektedir (Şekil 6.20). Bu yüzden alternatif bir yöntem kullanılmıştır. Alternatif yöntemde örnekler kalıplara yerleştirildikten sonra priz süreleri ve oturma değerleri incelenerek uç ve yan kalıp söküm zamanları tespit edilmektedir. Ölçümlere karışımın

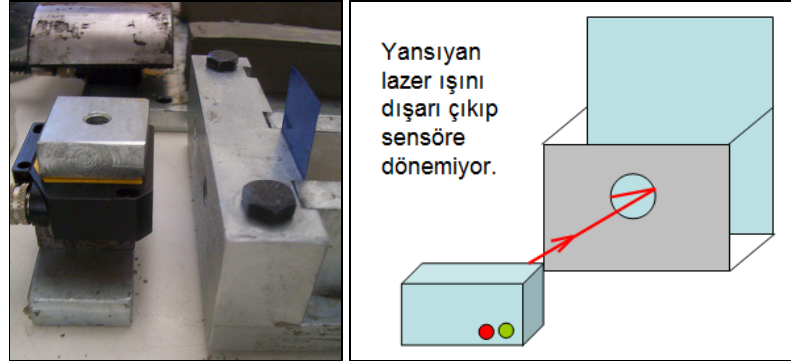
hazırlanmasından hemen sonra başlanmamaktadır. Aslında özellikle kendiliğinden yerleşen mikro beton gibi, akıcı kıvamlı malzemelerin boy değişimi ölçümüne malzeme daha sıvı kıvamda iken başlanması mantıklı değildir. Yarı katı hale geçinceye kadar beklenmesi halinde ölçümler daha anlamlı olacaktır. Yarı katı hale geçmenin göstergesi olarak priz süresi ve oturma değerlerinden elde edilen sonuçların kullanılabileceği bu çalışma kapsamında ortaya konulmuştur.



Şekil 6.18 Yarı ankastre kalıp sistemi ve iç yüzeyi polyester film kaplı kalıplar.



Şekil 6.19 Uç ve yan kalıpları açılmış yarı ankastre örnekler (ölçüm sırasında üstten görünüm).



Şekil 6.20. Uç kalıp kapalı olduğu durumda sistemde yaşanan ölçüm alma güçlüğü.

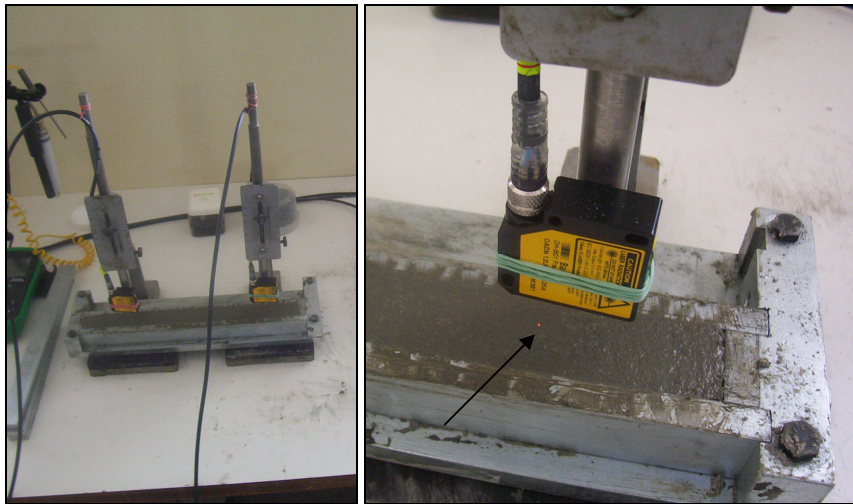
6.2.5 Standart Harç Örnekleri için Uygulanan Ölçüm Yöntemi

Standart harç karışımları kullanılarak hazırlanan örneklerde, boy değişimi ölçümleri için öncelikli olarak belirlenmesi gerekli olan parametre, ne zaman uç kalıbın açılıp ölçümlere başlanacağıdır. Diğer bir deyişle, yarı katı hale geçiş aşamasının belirlenmesi gerekmektedir (Chang-Wen, Qian, Wei, Jia-ping, 2007). Bu amaçla ilk aşamada priz süresi ve oturma ölçümleri yapılmıştır.

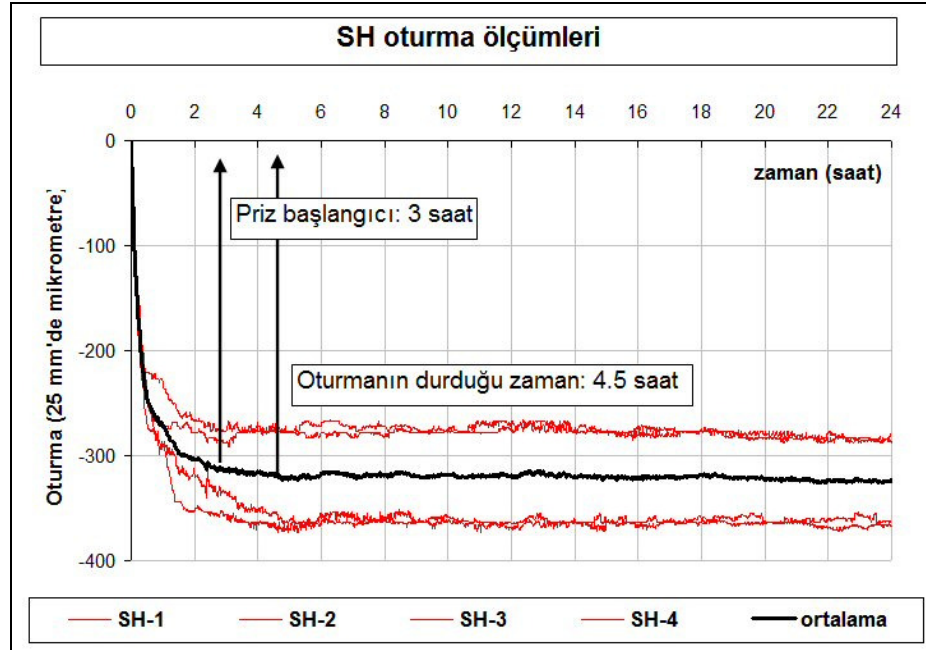
6.2.5.1 Priz Süresi ve Oturma Ölçümleri

Yapılan ön deneylerde, uç kalıp açma süresinin ölçülen büzülme değerini önemli derecede etkilediği gözlenmiştir. Uç kalıbın çok erken açılması halinde taze olan harç çökmekte ve başlangıçta büzülme yerine genleşme ölçülmesine neden olmaktadır. Diğer taraftan uç kalıp çok geç açılıp ölçüme başlanırsa, bu kez harcın yarı katı hale geçtikten sonra yaptığı büzülmenin bir kısmı ölçülememektedir. Ayrıca yan kalıpların açılma süresinin boy değişimine etkisi de bu aşamada incelenmiştir. Yan kalıpların açılması, nem kaybının gerçekleştiği yüzey alanını arttıracığından erken yaştaki büzülme doğrudan etkilemektedir. Çimento harçlarının priz başlangıç ve bitiş süreleri TS EN 196-3 standardına göre belirlenmiştir. Çimento harçlarının prizi yaklaşık 2,5-3 saatte başlamakta ve 4-4,5 saatte tamamlanmaktadır. Kıvam olarak kendiliğinden yerleşen mikro beton kadar akıcı olmayan bu karışımlar kalıba iki kademe halinde sıkıştırılarak yerleştirilmiştir.

Standart harçların perdahlama sonrası oturma değerlerinin zamana bağlı olarak ölçümü için farklı bir düzenek hazırlanmıştır. Bu düzenek hazırlanırken Kayir ve diğer., (2002) tarafından kullanılan sistem dikkate alınmıştır. Lazer sensörler düşey olarak bir Vicat cihazına sabitlenmiştir. Harç yüzeyine yaklaştırılan sensörler yaklaşık 21 mm'lik mesafede sabitlenmiş ve ilk andan itibaren oturma ölçümleri alınmaya başlanmıştır (Şekil 6.21). Ölçümler klimalı odada $20,7 \pm 0,6^\circ\text{C}$ sıcaklık ve $\%58,7 \pm 2,3$ bağıl nemde gerçekleştirilmiştir. Her örnek için ikişer noktadan alınan oturma verileri Şekil 6.22'de verilmiştir. Standart harçlar, ölçüme başlanan ilk andan itibaren 25 mm kalınlığındaki kesitte oturmakta, oturma zamana bağlı doğrusal olarak artmakta, örnekten örneğe değişmekle birlikte, ilk yarım saatten sonra doğrusallıktan sapmaktadır. Priz başlangıcı olarak kabul edilen 3 saatte oturma eğrisinin eğimi oldukça azalmaktadır. Oturma eğrisi yaklaşık 4-4,5 saatte tamamen yataylaşmaktadır. Daha sonra oturma değerlerinde bir değişiklik olmamaktadır. Oturmanın durduğu zamanla priz bitişi arasında yakın bir ilişki olduğu görülmektedir. Benzer sonuçlar Qi, Pease, Hossain, Puri, Weiss, Olek ve Shah (2002) tarafından rapor edilmiştir. Örneklerin oturma değeri 280 ile 360 mikron arasında değişmekte olup, yaklaşık ortalama 320 mikrondur. Elde edilen bu bulgular örneğin taze halden yarı katı hale geçme aşamasını oturma ölçümleriyle izlemenin olanaklı olduğunu göstermektedir. Buna dayanarak, boy değişimi ölçüm çalışmalarında uç kalıpların dökümden sonraki 3. ve 4,5. saatlerde sökölme durumlarının incelenmesine karar verilmiştir.



Şekil 6.21 Oturma ölçümleri için hazırlanan düzenek.

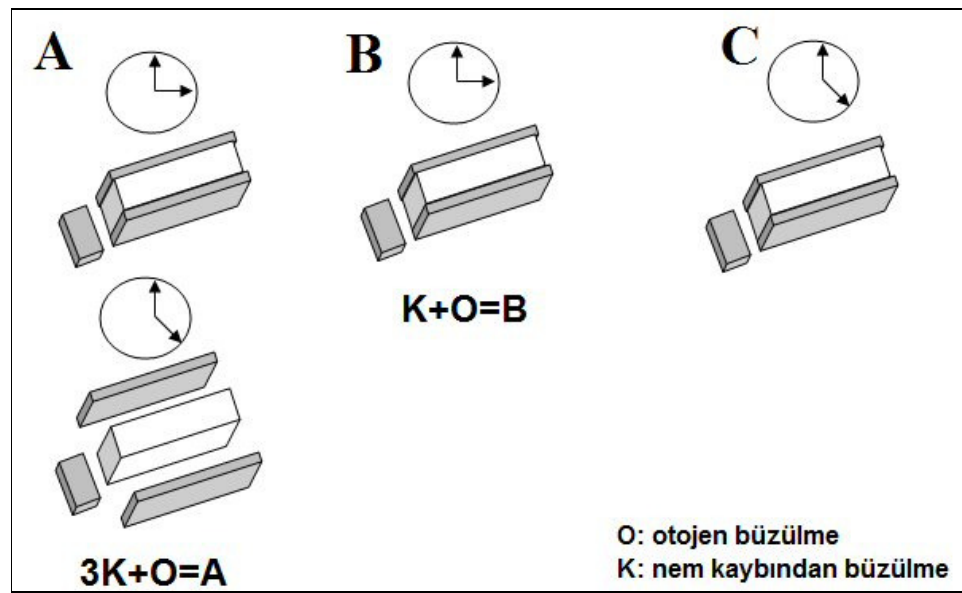


Şekil 6.22 Standart harç örneklerinin zamana bağlı oturma eğrileri.

6.2.5.2 Boy Değişimi Ölçümleri

Standart harç örneklerinin boy değişimleri uç ve yan kalıpların açılma stratejilerine göre üç grupta incelenmiştir. Gruplar A, B ve C harfleriyle simgelenmiş olup, temsili olarak Şekil 6.23'de şematize edilmiştir. A grubundaki örneklerin uç kalıpları açılacak en erken zaman olan 3 saatte açılmıştır. Daha erken açma teşebbüslerinde örnekler aşırı yumuşak olduğundan sarkma olabilmektedir. Prizin tamamlandığı ve oturmanın durduğu zaman olan 4,5 saatte, bu gruptaki örneklerin yan kalıpları sökülüştür. B grubundaki örneklerin ise uç kalıpları yine 3 saatte açılmış, ancak yan kalıpları hiç açılmamıştır. C grubundaki örneklerde uç kalıbın açılması için oturmanın tamamlandığı zaman olan 4,5 saate kadar beklenmiştir. Her seride 8 ile 10 arası örnek hazırlanmış, bazı örneklerden kırılma veya kayıt hatası nedeniyle veri alınamamıştır. Farklı kalıp açma uygulamalarının kullanılmasının nedeni, teorik olarak otojen büzülme değeri ile nem kaybından kaynaklanan büzülme değerlerinin, 3-24 saat arasında birbirinden ayırt edilip edilemeyeceğinin araştırılmasıdır. B koşulunda kalıbın üst yüzeyi (tek yüzey) kurumaya açık iken, ölçülen büzülme otojen büzülme de kapsamaktadır ($K+O=B$). A koşulunda ise 3 yüzey birden kuruma etkisinde olup, bu koşulda da aynı otojen büzülme söz

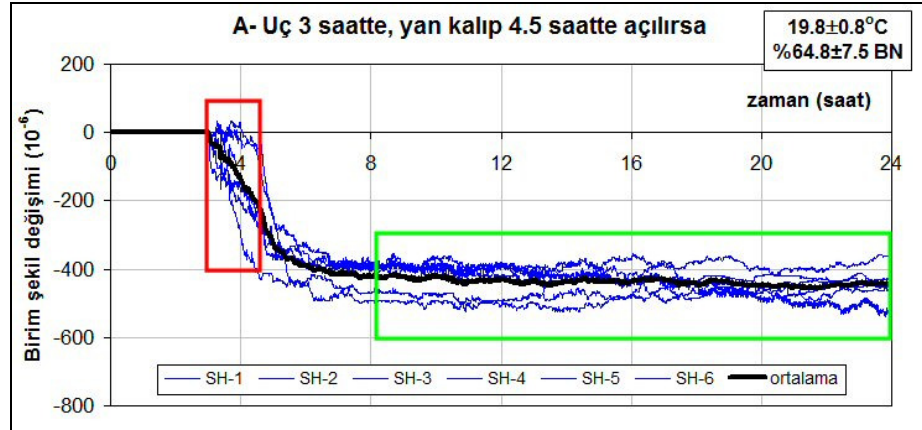
konusudur ($3K+O=A$). Elde edilen iki bilinmeyenli iki denklemden otojen büzülme ve nem kaybından kaynaklanan büzülme değerleri A ve B ölçüm sonuçları cinsinden yazılabilir ($O=(3B-A)/2$, $K=(A-B)/2$). Nem kaybından kaynaklanan büzülme değerleri ilk 24 saat için düşük nem, yüksek sıcaklık ve rüzgar durumunda plastik büzülme olarak adlandırılır. Ancak burada incelenen örnekler klimalı ortamda 20°C sıcaklık ve %55-65 bağıl nem ortalamasında test edildiği için plastik büzülme yerine nem kaybından büzülme olarak adlandırılmıştır. Ayrıca örneklerin çok küçük boyutlu olmaları nedeniyle termal genleşme-büzülme değerleri ihmal edilmiştir.



Şekil 6.23 Standart harçların büzülme ölçümlerinde kullanılan kalıp açma yöntemleri.

6.2.5.2.1 “A” grubu ölçüm sonuçları (Uç kalıbı erken sökme, yan kalıbı gecikmeli sökme). Standart harç örneklerinin 3 saatte uç kalıplarının 4,5 saatte de yan kalıplarının sökülmesi sonucu elde edilen grafik Şekil 6.24’de sunulmuştur. Birim boy değişimi hesaplamalarında büzülme veya genleşme değeri net çubuk boyuna (270 mm) bölünmüştür. Hazırlanan sekiz örnekten altısından sonuç alınmış, iki örnek kalıp yanları sökülürken kırılmıştır. Bir gün boyunca sıcaklık ve nem değerleri eş zamanlı olarak kaydedilmiş ve örnekler farklı günlerde hazırlandığı için ortalama değerler hesaplanan standart sapma değerleri ile birlikte grafik üzerine yazılmıştır. Sıcaklık yaklaşık 20°C, bağıl nem ise %65’tir. Uç kalıbın açıldığı üçüncü saatten itibaren bazı örneklerde genleşme, bazılarında büzülme gözlenmiştir. Ancak 4,5

saatten itibaren yan kalıpların açılmasıyla, tüm örneklerde hızlı bir büzülme meydana gelmekte, büzülme sekizinci saatten itibaren yavaşlamaktadır. Bir günlük bekleme sonunda ortalama büzülme değeri $-443 \cdot 10^{-6}$ olarak bulunmuştur.

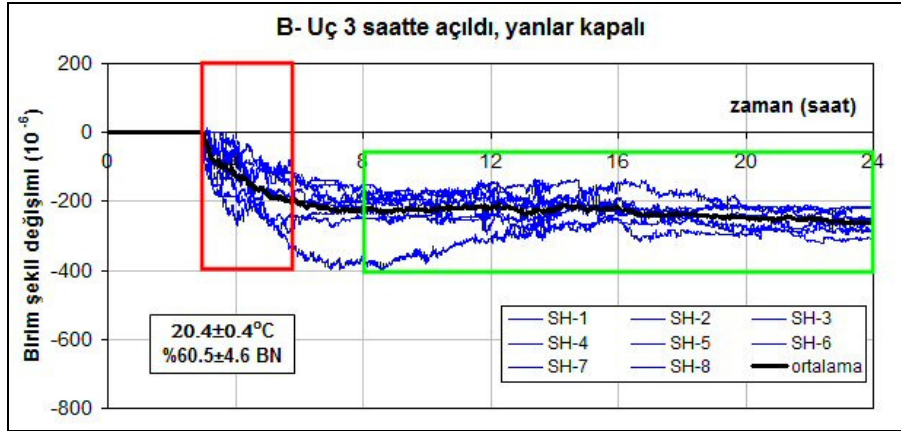


Şekil 6.24 Uç kalıbı dökümden 3 saat sonra, yan kalıpları ise 4,5 saat sonra açılan örneklerin zamana bağlı büzülme grafikleri.

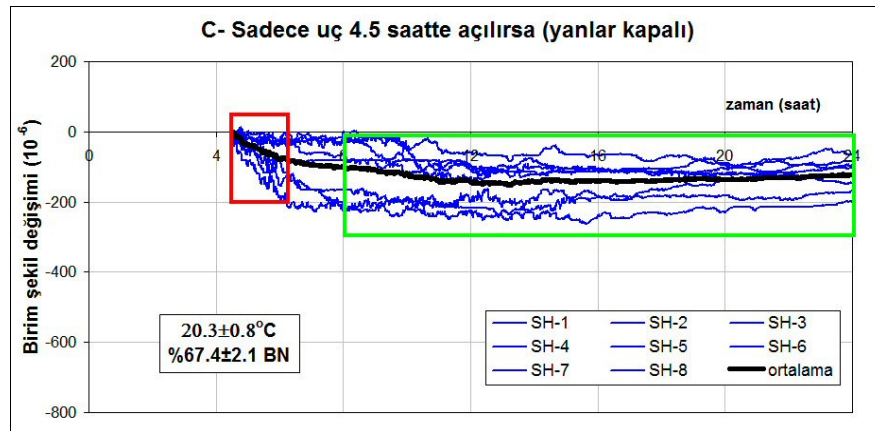
6.2.5.2.2 “B” grubu ölçüm sonuçları (Uç kalıbı erken sökme, yan kalıp kapalı). Uç kalıpların üç saatte açıldığı ve yan kalıpların hiç açılmadan 24 saat ölçüm alınan örneklerden elde edilen grafikler Şekil 6.25’de verilmiştir. Örneklerin uç kalıpları sökülmediği için tüm örneklerden veri alınabilmiş, kırılma olmamıştır. Ölçümler sırasında sıcaklık yaklaşık 20°C , bağıl nem ise %60’tır. Örnekler arasında farklılıklar olmakla birlikte, ortalama büzülme eğrisi yaklaşık 8 saatte yataylaşmıştır. Ölçümün sonlarına doğru 16. saatten sonra yavaş da olsa büzülme değeri artmış ve $-264 \cdot 10^{-6}$ değerine ulaşmıştır. Ancak örnekler arasındaki değişkenlikler nedeniyle büzülme değeri $-220 \cdot 10^{-6}$ ile $-310 \cdot 10^{-6}$ arasında değişmektedir. Aynı saatte uç kalıbı açılan ancak yan kalıpları 4,5 saat sonra sökülen A grubu örneklerine kıyasla neredeyse yarı yarıya daha az büzülme ölçülmüştür. Dökümden sonraki 3-4,5 saat aralığında sadece 2 yan yüzeyden nem kaybından dolayı meydana gelen büzülme ortalama $-179 \cdot 10^{-6}$ ’dır.

6.2.5.2.3 “C” grubu ölçüm sonuçları (Uç kalıbı gecikmeli sökme, yan kalıp kapalı). Uç kalıpların gecikmeli olarak oturmanın tamamlandığı saatte açıldığı ve yan kalıpların hiç açılmadan 24 saat ölçüm alındığı örneklerden elde edilen grafikler

Şekil 6.26’da verilmiştir. Ölçümler sırasında sıcaklık yaklaşık 20°C, bağıl nem ise %67’dir. Dökümden 4,5 saat sonra ölçülmeye başlanan büzülme, 10. saate kadar yavaşlayarak artmaya devam etmiş daha sonra hafifçe genleşme ölçülmüştür. Sonuçta 24. saatteki büzülme değeri ortalama $-123 \cdot 10^{-6}$ değerini almıştır. Ancak örnekler arasındaki değişkenlikler nedeniyle büzülme değeri $-65 \cdot 10^{-6}$ ile $-200 \cdot 10^{-6}$ arasında değişmektedir.



Şekil 6.25 Uç kalıbı dökümden 3 saat sonra açılan ve yan kalıpları kapalı bırakılan örneklerin zamana bağlı büzülme grafikleri.

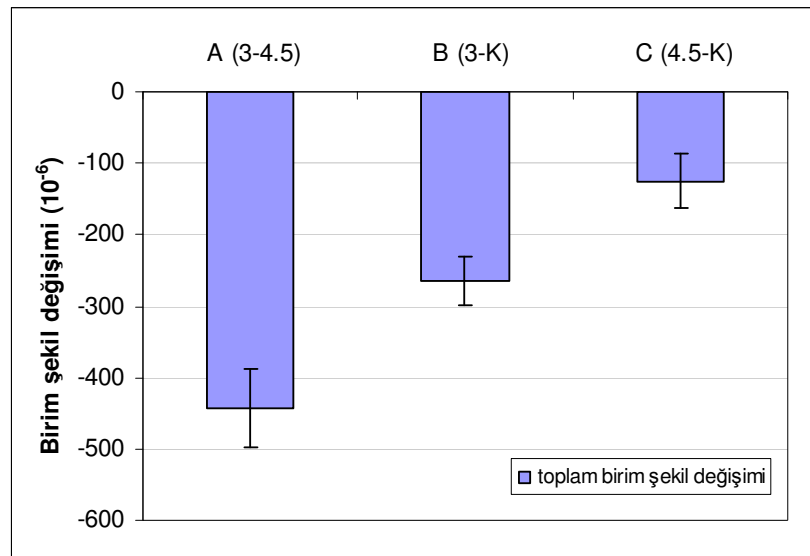


Şekil 6.26 Uç kalıbı dökümden 4,5 saat sonra açılan ve yan kalıpları kapalı bırakılan örneklerin zamana bağlı büzülme grafikleri.

Yan kalıpların kapalı olduğu ancak uç kalıbın daha erken söküldüğü B grubu ölçümlerine kıyasla nihai büzülme değerleri yaklaşık yarı yarıya azalmıştır. *Uç kalıbı sökmeyi 1,5 saat geciktirmek, yan kalıplar kapalıyken örnekte meydana gelen büzülmenin %50 daha az ölçülmesine neden olmaktadır.*

6.2.5.3 Çimento Harçlarından Elde Edilen Sonuçların Genel Değerlendirmesi

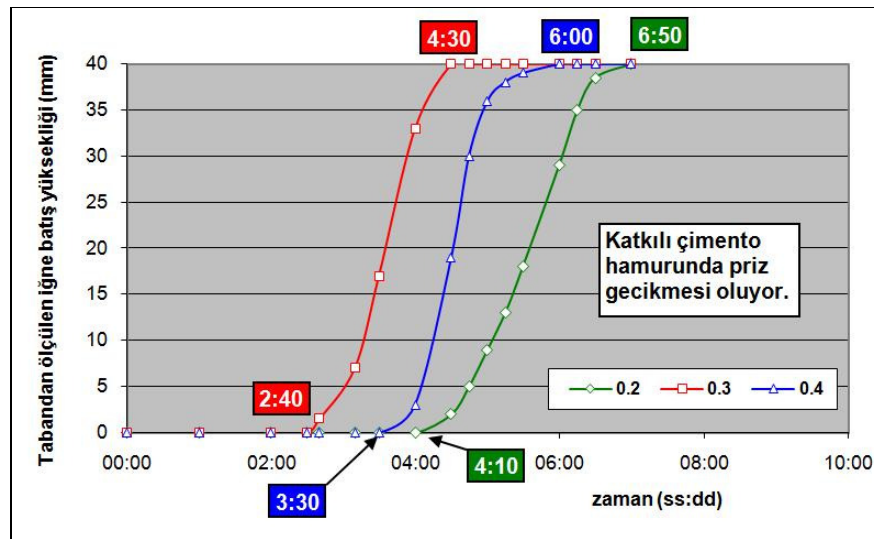
Yapılan denemeler sonucunda standart harcın, yarı-katı hale geldikten hemen sonra ölçülen büzülme değerinin uç kalıbı açma süresine ve yan kalıpların açılıp açılmamasına göre değiştiği belirlenmiştir. Şekil 6.27’de üç farklı koşul için elde edilen 24 saatlik büzülme değerleri bir arada verilmiştir. Yarı-katı hale geçiş için kritik zamanın priz başlangıcı olduğu kabul edilirse, yan kalıpların kapalı olduğu durumdaki 24 saatlik büzülme $-264 \cdot 10^{-6}$ değerini almaktadır. Diğer yandan oturmanın durduğu an, yarı-katı hale geçiş için kritik zaman olarak kabul edilirse, 24 saatlik büzülme $-123 \cdot 10^{-6}$ olarak ölçülmektedir. Bu durumda büzülme ölçümünde yarı yarıya kayıp olmaktadır. Standart harç örnekleri için, yarı-katı hale geçiş süresinin priz başlangıcı dikkate alınarak belirlenmesinin, büzülmenin ölçümü açısından daha sağlıklı olduğu söylenebilir. A ve B koşulları için Şekil 6.23’de verilen model uygulanarak otojen büzülme ile kuruma büzülmesi birbirinden ayırt edilmiştir. Üç yüzeyi (2 yan kalıp yüzeyi ve perdah yüzeyi) açık olan örneklerde teorik kuruma büzülmesi değeri $3K = -268 \cdot 10^{-6}$ olarak hesaplanmıştır. Tek yüzeyin açık olması durumunda kuruma büzülmesi değeri bu değerin 1/3’ü olarak alınabilir ($K = -89.5 \cdot 10^{-6}$). Otojen büzülme ise 3-24 saat arasında toplam $O = -174 \cdot 10^{-6}$ değerindedir.



Şekil 6.27 Üç farklı koşul için standart harç örneklerinden elde edilen 24 saatlik büzülme değerleri.

6.2.6 Çimento Hamuru Örnekleri için Uygulanan Ölçüm Yöntemi ve Sonuçlar

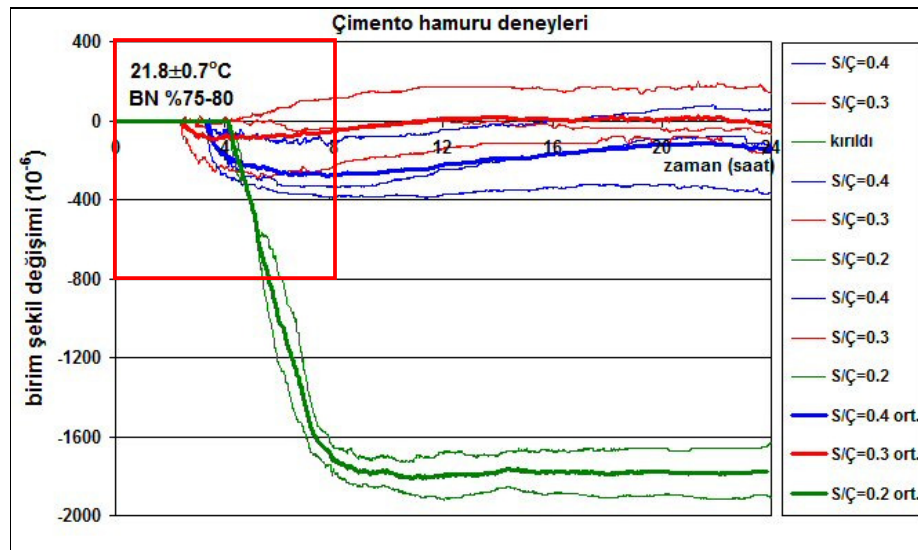
Bu bölümde mikro betonların hazırlanmasında kullanılan çimento ile üç farklı S/Ç oranında (0,4, 0,3 ve 0,2) çimento hamuru örneği hazırlanmıştır. S/Ç oranı 0,3 olan örnekler kalıba tokmaklanarak yerleştirilebilir kıvamda iken S/Ç oranı 0,4 olan karışımlar oldukça akıcı bir kıvamdadır. Diğer taraftan S/Ç oranı 0,2 olan çimento hamurunun, yerleştirilebilir kıvamda olması için polikarboksilat bazlı bir akışkanlaştırıcı katkı çimento ağırlığının %0,5'i oranında kullanılmıştır. Çimento hamuru örneklerinin davranışları standart harçlardan çok daha farklı olacağı için, öncelikle uç kalıp açma sürelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla TS EN 196-3 standardına göre priz deneyleri yapılmıştır. S/Ç oranı 0,3 ve 0,4 olan hamurlarda priz yaklaşık 3 saatte başlarken, katkılı ve S/Ç oranı en düşük olan karışımda priz başlangıcı 4 saate kadar gecikmektedir (Şekil 6.28).



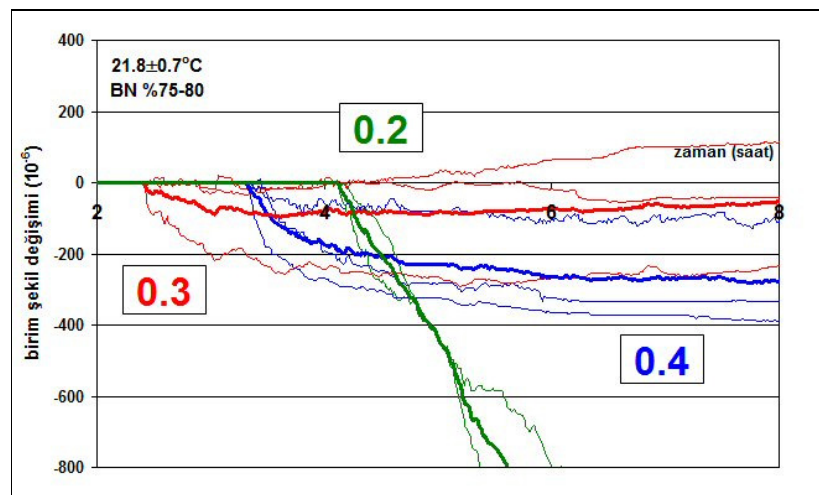
Şekil 6.28 Çimento hamurlarının priz sürelerinin S/Ç oranına göre değişimi.

Tüm karışımlarda yaklaşık priz başlangıcında uç kalıp sökülüş ve ölçüme başlanmıştır. Bu süreler azalan S/Ç oranı için sırasıyla 3 saat 30 dakika, 2 saat 40 dakika ve 4 saat 10 dakikadır. Elde edilen sonuçlar Şekil 6.29 ve 6.30'da verilmiştir. Uç kalıp açılışından itibaren S/Ç oranı en düşük olan çimento hamuru örneğinin hızla büzüldüğü, diğer örneklerin ise daha yavaş büzüldüğü görülmektedir. S/Ç oranı 0,2 olan örnek 8 saate kadar büzülmeye devam ederken diğer örneklerde büzülme uç

kalıbın açılmasından 2 ile 5 saat sonra durmaktadır. Çimento hamurlarının büzülme deneylerinin gerçekleştirildiği koşullar, %75-80 bağıl nem ve yaklaşık 22°C'de olduğu için, kurumadan kaynaklanan büzülmenin etkisi otojen büzülmeden daha azdır. Aynı zamanda yan kalıplar da açılmamıştır. Tüm bu veriler bir araya getirildiğinde, düşük S/Ç oranının çimentonun otojen büzülme hassasiyetini ortaya çıkarma potansiyeli net bir şekilde gözlenebilmektedir. S/Ç oranı yüksek örneklerde otojen büzülme ihmal edilebilecek mertebelerdedir.



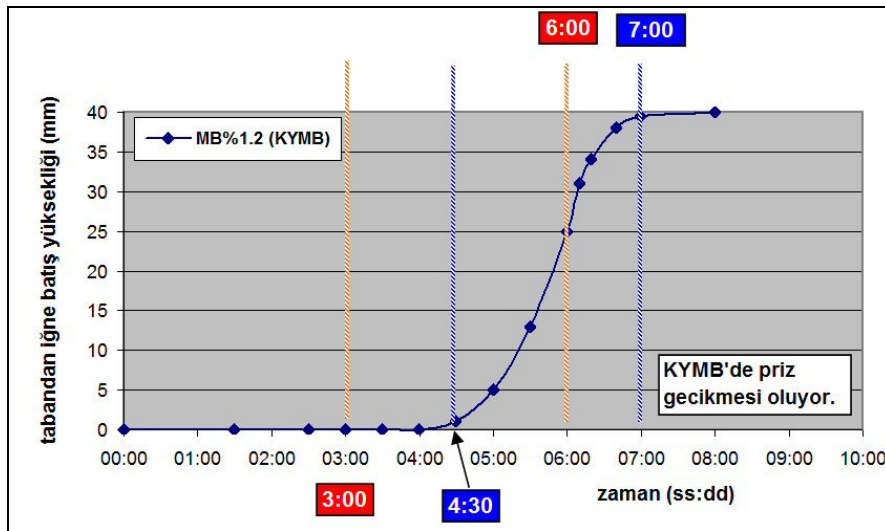
Şekil 6.29 Çimento hamurlarının 24 saatlik büzülme değerlerinin S/Ç oranına göre değişimi.



Şekil 6.30 Çimento hamurlarının 24 saatlik büzülme değerlerinin S/Ç oranına göre değişimi (Uç kalıp açışı ve ölçüm başlangıcı detayı).

6.2.7 Mikro Beton Örnekleri için Uygulanan Ölçüm Yöntemi ve Sonuçlar

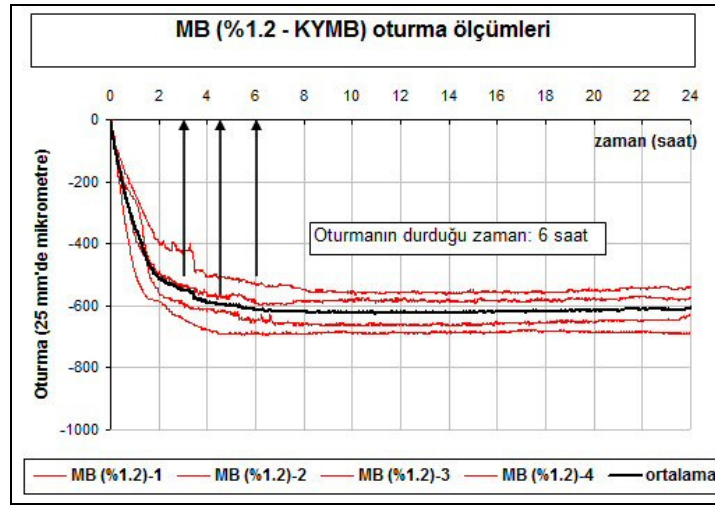
Mikro beton örneklerinin incelenmesine lifsiz MI matrisi ile başlanmıştır. Uç ve yan kalıpların sökümü için bekleme süresinin belirlenmesi için priz deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kendiliğinden yerleşen kıvamdaki MI matrisinin priz başlangıç süresi 4,5 saat, priz bitişi ise 7 saat civarındadır (Şekil 6.31). Mikro betonun priz süreleri standart harca kıyasla önemli derecede gecikmektedir. Ayrıca mikro beton örneklerinin oturma ölçümleri de yapılmıştır (Şekil 6.32). Mikro beton örnekleri ilk bir saat süresince hızla oturmakta, oturma 6 saate kadar yavaşlayarak devam etmektedir. Oturmanın tamamlanması ile priz süresinin tamamlanması için geçen sürelerin birbirine yakın oldukları belirlenmiştir.



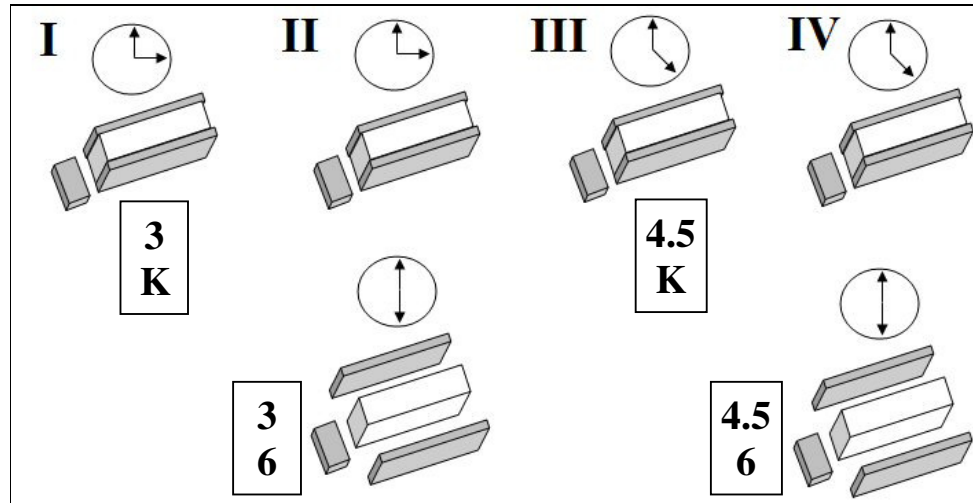
Şekil 6.31 MI matrisli mikro beton örneklerinin priz süresi.

Standart harç örneklerinin boy değişimlerinde olduğu gibi, mikro betonlarda da uç ve yan kalıpların açılma stratejilerine göre farklı ölçüm yöntemleri incelenmiştir. Yöntemler I, II, III ve IV numaralarıyla simgelenmiş olup, temsili olarak Şekil 6.33'de şematize edilmiştir. Yapılan ön denemelerde uç kalıp açma süresinin 3 (priz başlangıcı olan 4,5 saatten önce) ve 4,5 saatte olması durumlarının incelenmesi uygun bulunmuştur (Ölçüm I ve III). Oldukça erken bir uç kalıp açma süresi olan 3 saatin seçilmesinin nedeni, hem çimento harcı ile karşılaştırma yapabilmek, hem de mümkün olan en erken zamanda uç kalıp açmanın ve ölçüme

başlamanın etkisini görmektir. Uç kalıbı 3 saatte açılan örneklerin bazıları, kalıp açışı sırasında hasar görmüş ve kullanılamamıştır. Sağlam kalan örneklerden alınan veriler Şekil 6.34 ve 6.35’de sunulacaktır. Ayrıca yan kalıpların oturmaının tamamlandığı 6 saatte açılması durumu da incelenmiştir (Ölçüm II ve IV). Böylece mikro betonun büzülme potansiyeli farklı deney koşullarında gözlenmiştir. Otojen büzülme ile nem kaybından kaynaklanan büzülmenin birbirinden ayırt edilmesinde, standart harçlar için kullanılan model sırasıyla I-II ve III-IV ölçüm grupları için ayrı ayrı uygulanmıştır.



Şekil 6.32 MI matrisli mikro beton örneklerinin oturma ölçümleri.

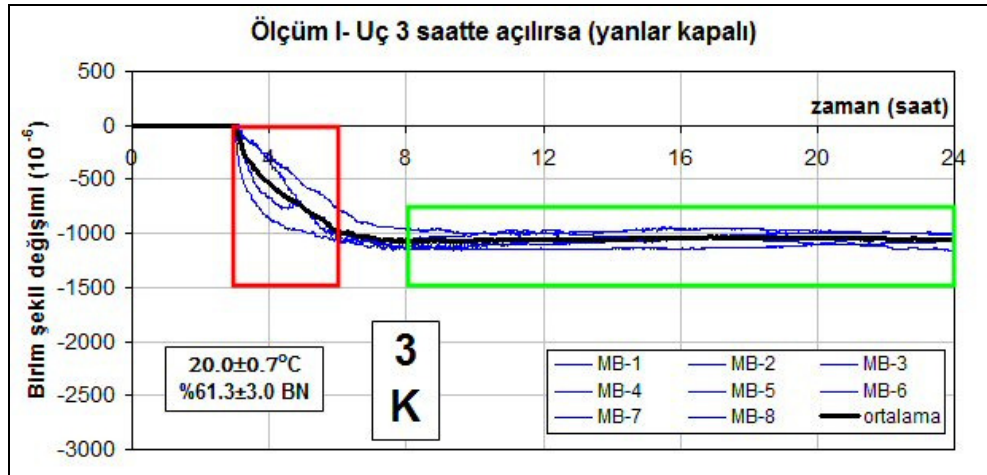


Şekil 6.33 Mikro beton örneklerinin uç ve yan kalıplarının açılma stratejilerine göre uygulanan farklı ölçüm yöntemleri ve kullanılan kodlamalar.

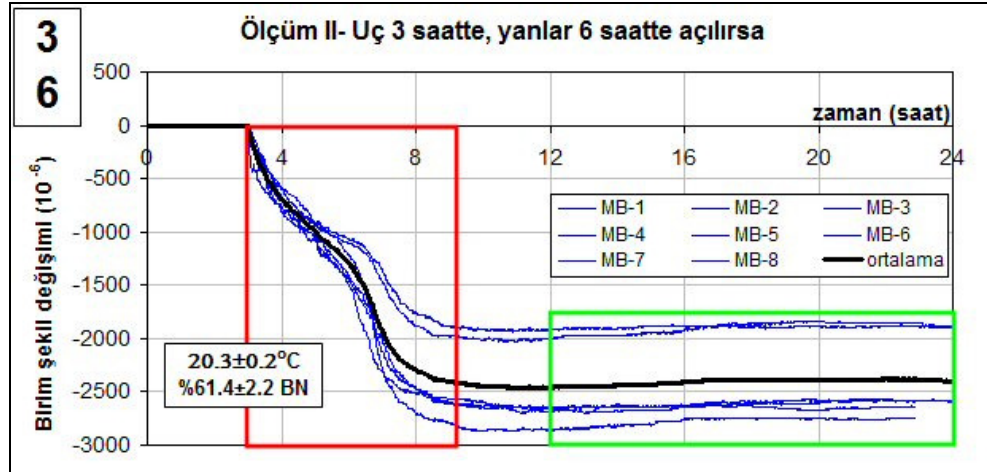
Mikro betonların kalıp uçlarının 3 saat gibi erken bir sürede sökülmesi örneklere zarar vermektedir. Deney için hazırlanan 8 örnekten ancak 4 tanesinde çubuğun serbest ucundaki kalıp, örnek sağlam kalarak sökülebilmiştir. Bazı örneklerde sarkma, bazılarında çatlama nedeniyle veri alınamamıştır. Veri alınabilen örneklerden elde edilen büzülme eğrileri Şekil 6.34’de verilmiştir. Ortalama büzülme değerlerinden elde edilen eğri, siyah renkli olarak çizilmiştir. Ölçümler sırasında sıcaklık ve bağıl nem değerleri sırasıyla 20°C ve %61’dir. Uç kalıbın açılmasından itibaren, azalan eğimde büzülme artışı 6 saate kadar devam etmektedir. Daha sonra hafif bir genleşme gözlenmesine rağmen, 24 saat sonunda büzülme değeri $-1063 \cdot 10^{-6}$ olmaktadır. Çimento harcının yanları kapalı durumdaki büzülme değeri ile kıyaslandığında (Şekil 6.27 - Grup B: $-264 \cdot 10^{-6}$), ilk 24 saatteki büzülmenin mikro betonda 4 kat daha fazla olduğu görülebilir. Kalıp ucu 3 saatte açılıp, yanlar da oturmanın durduğu 6 saatte söküldüğünde, Şekil 6.35’de görülen grafikler elde edilmiştir. Deneylerin gerçekleştirildiği nem ve sıcaklık bir önceki ölçüm ile oldukça yakındır. Yan kalıpların açıldığı 6. saatte yeniden bir büzülme artışı gözlenmektedir. Sonuçta 24 saatlik büzülme değeri $-2390 \cdot 10^{-6}$ ’ya çıkmaktadır. Bu değer yan kalıpların açılmadığı durumdaki değer iki katından daha fazladır.

Uç kalıpların sökümü için priz başlangıcı üst sınırı olan 4,5 saat kullanılırsa, elde edilecek büzülme verileri III. ve IV. ölçüm yöntemlerinde incelenmiştir. Uç kalıbın 4,5 saate açılıp, yan kalıpların sökülmediği III. durumda elde edilen eğriler Şekil 6.36’de sunulmuştur. Büzülme kalıp ucu açışını takip eden 3,5 saat boyunca azalan bir eğimde artmakta, daha sonra çok hafif şekilde genleşme olmaktadır. Ancak sonuç büzülme değeri ortalama $-582 \cdot 10^{-6}$ dolaylarındadır. Yan kalıpların da 6 saat sonunda açıldığı IV. durum için büzülme eğrileri Şekil 6.37’de verilmiştir. Yan kalıpların açılması ile büzülmenin artışı net bir şekilde görülmektedir. Büzülmenin durması yaklaşık 12 saatte gerçekleşmektedir. 12 saatten sonra hafif bir genleşme gözlenmektedir. Sonuçta toplam büzülme değeri ortalama $-1560 \cdot 10^{-6}$ ’dır. Yan kalıpların kapalı olduğu duruma göre 3 kat daha fazla büzülme kaydedilmiştir.

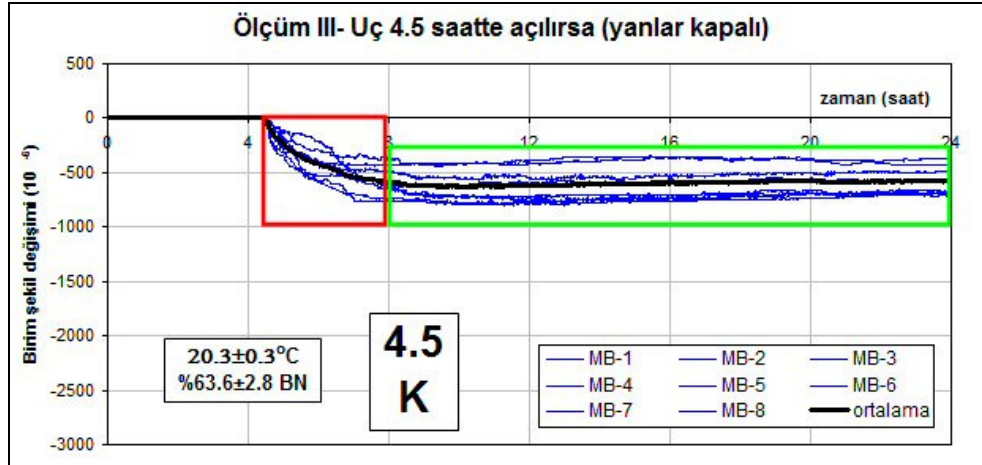
Tüm durumlar bir arada değerlendirildiğinde, erken kalıp açmanın ölçülen büzülme değerini arttırdığı görülmektedir (Şekil 6.38). Yan kalıpların açılması da kuruma kaynaklı büzülme için gerekli alanı arttırması nedeniyle, ölçülen toplam büzülmeyi 2-3 kat arttırmaktadır. Daha sonraki ölçümlerde, uç kalıbın 3 saat gibi erken bir sürede açılması, örneğe zarar verme ihtimali yüksek olduğundan tercih edilmemiştir.



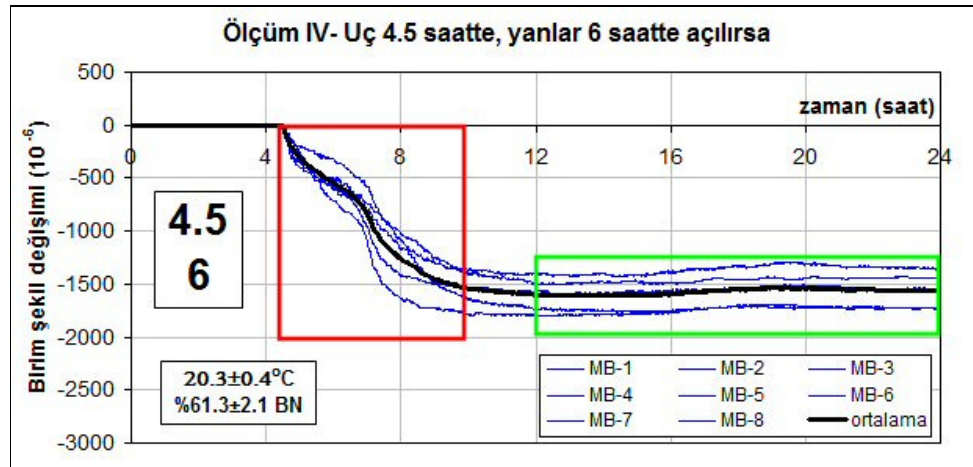
Şekil 6.34 Mikro betonların I. durum için zamana bağlı büzülme eğrileri.



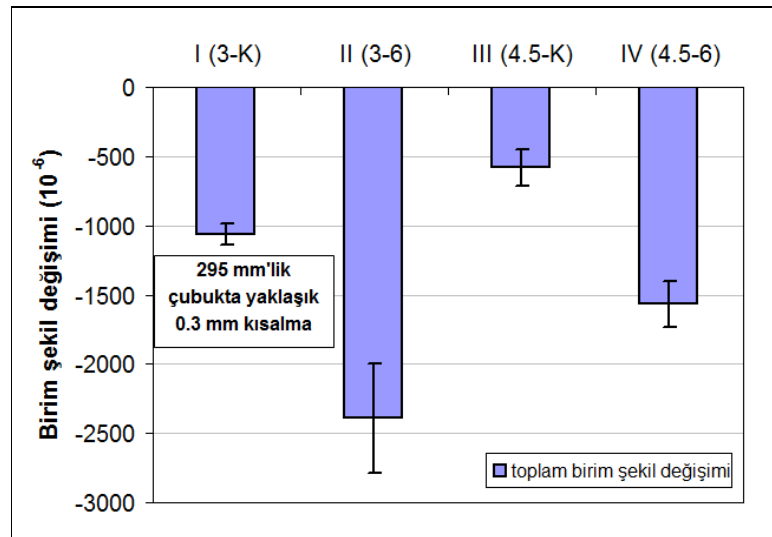
Şekil 6.35 Mikro betonların II. durum için zamana bağlı büzülme eğrileri.



Şekil 6.36 Mikro Betonların III. durum için zamana bağlı büzülme eğrileri.



Şekil 6.37 Mikro Betonların IV. durum için zamana bağlı büzülme eğrileri.



Şekil 6.38 Dört farklı durum için mikro betonların 24 saatlik büzülme değerleri.

Otojen büzülme ile kuruma büzülmesinin birbirinden ayırt edilmesi amacıyla önerilen model kullanıldığında I.-II. ölçüm grupları ve III.-IV. ölçüm grupları için ayrı ayrı değerler hesaplanmıştır. Bu değerlerin verildiği Tablo 6.3’de görüldüğü gibi, uç kalıp sökümünü geciktirmek *ölçülen* otojen büzülme miktarını önemli derecede azaltmaktadır.

Tablo 6.3 Otojen büzülme ile kuruma büzülmesinin birbirinden ayırt edilmesi.

Şekil 6.34’de önerilen modellere göre hesaplanan kuruma büzülmesi ve otojen büzülme değerleri	Sadece üst yüzeyin açık olduğu durumda, nem kaybından kaynaklanan büzülme (K_i)	Yan yüzeylerinde açık olduğu durumda, nem kaybından kaynaklanan büzülme ($3K_i$)	Otojen büzülme (O_i)	Toplam büzülme (K_i+O_i) ($3K_i+O_i$)
I.-II. ölçüm grupları kullanılarak hesaplanan değerler (K_{I-II})	$-664 \cdot 10^{-6}$ -	- $-1991 \cdot 10^{-6}$	$-399 \cdot 10^{-6}$ $-399 \cdot 10^{-6}$	$-1063 \cdot 10^{-6}$ $-2390 \cdot 10^{-6}$
III.-IV. ölçüm grupları kullanılarak hesaplanan değerler (K_{III-IV})	$-489 \cdot 10^{-6}$ -	- $-1467 \cdot 10^{-6}$	$-93 \cdot 10^{-6}$ $-93 \cdot 10^{-6}$	$-582 \cdot 10^{-6}$ $-1560 \cdot 10^{-6}$

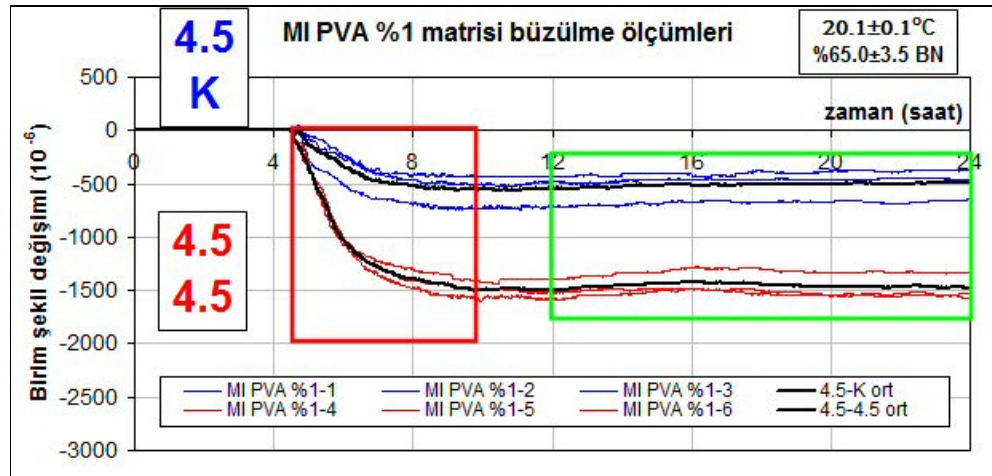
6.2.8 Lifli Mikro Beton Örnekleri için Uygulanan Ölçüm Yöntemi ve Sonuçlar

İki farklı polimer kökenli lif (Polivinil alkol – PVA ve Polipropilen – PP) kullanılarak hazırlanan mikro betonların ilk 24 saatteki büzülme potansiyelleri incelenmiştir. Bu amaçla hacimce %1 lif içeren karışımlar hazırlanmıştır. Her karışımdan altışar örnek hazırlanmıştır. Bunlardan üç tanesinin uç kalıbı 4,5 saatte sökülüş ve yan kalıplar kapalı olarak ölçüme devam edilmiştir (4,5, K). Diğer üç tanesinin ise hem uç, hem de yan kalıpları 4,5 saatte sökülüşdür. Lifsiz mikro betonlarda yan kalıbı açmak için 6 saat bekleme yapılmasına rağmen, bu örneklerde liflerin matrisi tutucu etkisi nedeniyle 6 saate kadar beklemeye gerek duyulmamıştır. PVA ve PP lifli mikro betonlardan elde edilen büzülme eğrileri, genel olarak birbirine benzemekle birlikte PP lifli mikro betonlarda yan kalıpların açık olduğu durumdaki büzülme değerleri biraz daha düşüktür (Şekil 6.39, 6.40). Lifsiz mikro betondan elde edilen büzülme değerleri ile lifli mikro betonların büzülme değerleri benzer koşullar için Tablo 6.4’de karşılaştırılmıştır. Özellikle yan kalıpların kapalı olduğu durumda lifli mikro betonlarla lifsiz mikro betonlar arasında belirgin bir fark

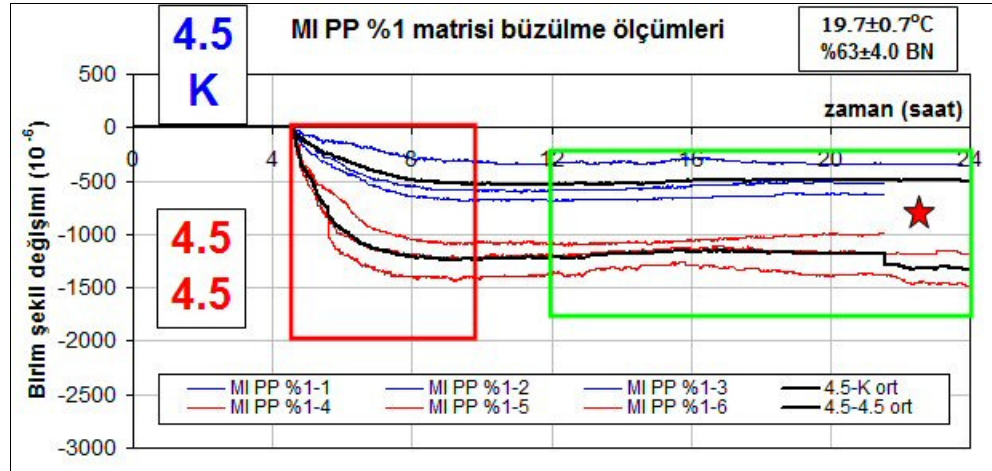
yoktur. Yan kalıplar açıldığında ise, PP lifli mikro betonların büzülme değerinin bir miktar daha düşük olduğu görülmektedir.

Tablo 6.4 Lifli ve lifsiz mikro betonların 24 saatlik büzülme değerleri

Kalıp açma durumu	Lifsiz MI matrisli mikro beton	Polivinil alkol lifli mikro beton	Polipropilen lifli mikro beton
Uç 4,5 saatte, yanlar kapalı	$-582 \cdot 10^{-6}$	$-489 \cdot 10^{-6}$	$-491 \cdot 10^{-6}$
Uç 4,5, yanlar 6 saatte	$-1560 \cdot 10^{-6}$	-	-
Uç 4,5, yanlar 4,5 saatte	-	$-1478 \cdot 10^{-6}$	$-1185 \cdot 10^{-6}$ $-1328 \cdot 10^{-6}$



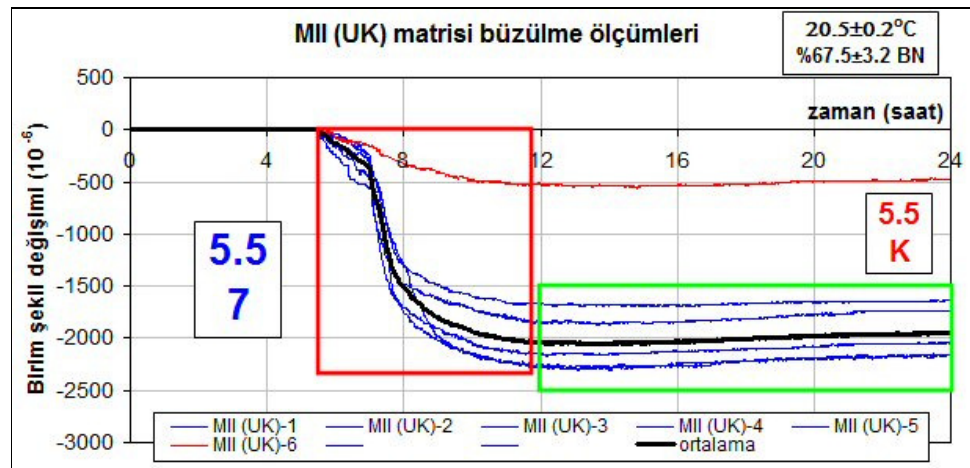
Şekil 6.39 PVA lifi (%1) içeren MI matrisinin ilk 24 saat büzülme grafiği.



Şekil 6.40 PP lifi (%1) içeren MI matrisinin ilk 24 saat büzülme grafiği. Not: Bazı örneklerde 22 saatten sonraki veri alınamamıştır.

6.2.9 Uçucu Küllü MII Matrisi ile Hazırlanan Mikro Beton Örnekleri için Uygulanan Ölçüm Yöntemi ve Sonuçlar

Matris kompozisyonunda çimentonun ağırlıkça %50'sinin, uçucu kül ile ikame edildiği MII matrisi kullanılarak örnekler hazırlanmıştır. Uçucu küllü MII matrisinin priz süresi MI matrisine göre biraz daha uzun olduğu için (Priz başlangıcı 5,5 saat, priz bitişi 7 saat) kalıp ucu 5,5 saatte ve yan kalıplar 7 saatte sökülüştür. Toplam 6 örnek hazırlanmıştır. Örneklerden beş tanesine sözü edilen yöntem uygulanırken, birisinin yan kalıpları 7 saatte sökülmemiş ve sadece uç kalıbı sökülü olarak ölçüm alınmıştır. Deney sonuçları Şekil 6.41'de sunulmuştur. Diğer matrise göre daha geç uç kalıbı sökülmesine rağmen, yanlar kapalı olarak yapılan büzülme ölçümünden benzer büzülme değeri elde edilmiştir ($-477 \cdot 10^{-6}$). Ancak yan kalıplar açılarak yapılan ölçümlerde uçucu küllü matrisin daha fazla büzüldüğü görülmüştür. 24 saatin sonunda ölçülen ortalama büzülme değeri $-1950 \cdot 10^{-6}$ 'dır. Büzülme ölçümünün prizdeki gecikme nedeniyle daha geç başlatılmasına rağmen, ölçülen yüksek büzülme değeri uçucu küllü tasarımın S/Ç oranının göreceli olarak yüksekliğinden kaynaklanmış olabilir. Ancak, ölçümün 12-24. saatleri arası tüm örneklerde yavaş ama düzenli bir genleşme gözlemlendiği de vurgulanmalıdır.



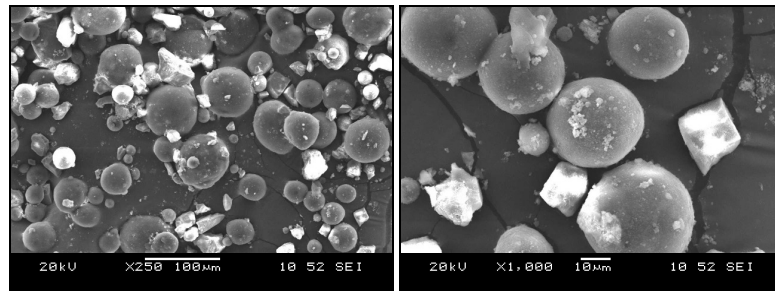
Şekil 6.41 Uçucu küllü MII matrisinin ilk 24 saatlik büzülme grafiği.

6.2.10 Mikro Betona Polimer Katkısı İlavesinin Büzülmeye Etkisi

Polimer katkıların, mikro betonun büzülmesine etkisini incelemek amacıyla suda yeniden dağılabilir bir polimer katkısı kullanılmıştır. İsveç, Elotex AG firmasının ürettiği Elotex WS45 katkısının temel bileşeni vinil asetat ve vinil versatet kopolimeridir. Ayrıca koruyucu kolloit olarak polivinil alkol ve topaklaşmayı önleyici katkıları (anti-blocking agents) içermektedir. Yüksek hidrofobik özellik taşıdığı için %3-5 kullanım oranlarıyla su yalıtım harçları için su itici toz polimer olarak kullanılabilir ve kendiliğinden köpük kesici olduğu üretici firma tarafından beyan edilmiştir. Fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 6.5’de verilmiştir. Toz polimerlerin tane morfolojilerini incelemek amacıyla yapılan taramalı elektron mikroskobu incelemelerinde Elotex WS45 taneciklerinin küresel yapıda olduğu belirlenmiştir (Şekil 6.42).

Tablo 6.5 Elotex WS45 katkısının fiziksel ve kimyasal özellikleri.

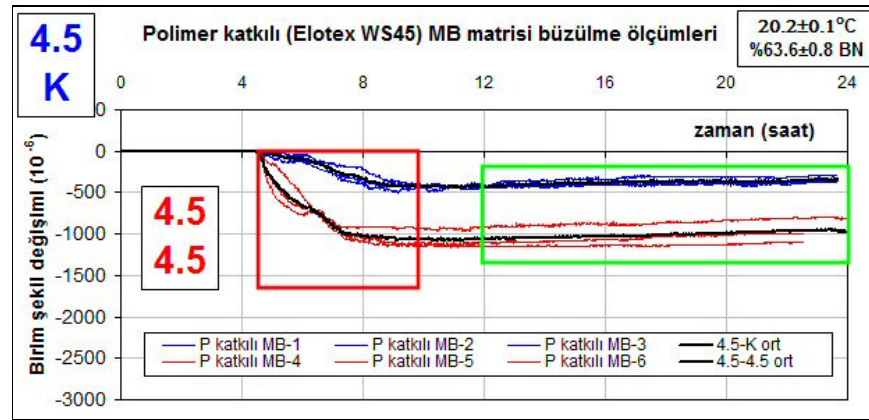
Ticari isim	Elotex WS45
Kimyasal köken	Vinil asetat ve vinil versatet kopolimeri
Koruyucu kolloit	Polivinil alkol
En düşük film oluşturma sıcaklığı	0 °C
Yığın yoğunluğu	470-570 kg/m ³
Tane boyutu	<100 mikron
Nem	en fazla %1
Kül miktarı (1000°C)	%10,5±1,5



Şekil 6.42 Toz polimerlerin tane yapısı.

MI matrisi ile hazırlanan mikro betonlara %5 oranında polimer katkısı ilavesi yapılmıştır. Kıvamda bir miktar yumuşama olduğu gözlenmiştir. Örnekler kalıplara sıkıştırma ihtiyacı duyulmaksızın yerleştirilmiştir. Toplam altı örnek hazırlanmıştır.

Üç tanesinde ölçüm için uç kalıp 4,5 saatte sökülmüş ve yan kalıplar kapalı bırakılmıştır. Diğer üç örneğin ise, yan kalıpları 4,5 saatte uç kalıpla aynı anda sökülmüştür. Büzülme ölçümü sonuçları Şekil 6.43’de sunulmuştur. Sadece uç kalıbın söküldüğü örneklerde büzülme değeri 24 saatte ortalama $-349 \cdot 10^{-6}$ olup, 12. saatten sonra diğer örneklerde de gözlenen genleşme davranışı belirlenmiştir. Yan kalıpların 4,5 saatte açıldığı durumda, ölçülen toplam büzülme değeri $-957 \cdot 10^{-6}$ bulunmuştur. Kontrol mikro betonlarında uç kalıbı 4,5 saatte, yan kalıbı 6 saatte açılan seride elde edilen 24 saatlik birim büzülme değeri ortalama $-1500 \cdot 10^{-6}$ iken, elotex katkılı mikro betonlarda %30-35’lik büzülme azalması söz konusudur. Polimer kümeciklerinin matrise yayılması ve hidrasyonun ilerleyen aşamalarında hidrasyon ürünleri etrafında film oluşturması, mikro betonun büzülme miktarını azaltmış olabilir.



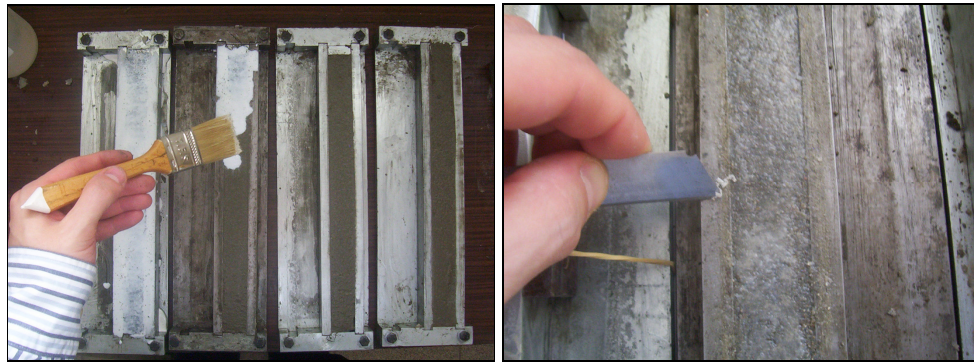
Şekil 6.43 Elotex WS45 katkısının mikro betonun büzülme davranışına etkisi.

6.2.11 Mikro Beton ve Standart Harç Örneklerinin Otojen Büzülme Potansiyelinin DeneySEL Olarak Tespiti (Parafin Uygulaması)

Bölüm 6.2.5 ve 6.2.7’de incelenen mikro beton ve standart harç örnekleri yardımıyla bazı kabuller yaparak “teorik otojen büzülme değerleri” hesaplanmıştır. Yapılan denemelerde elde edilen tecrübeler ile “otojen büzülme” değerinin deneysel olarak da ölçülebileceği düşünülmüş ve şu yöntem kullanılmıştır:

Otojen büzülmenin ölçümü için örneğin dış ortamla nem alışverişi dökümden hemen sonra kesilmelidir. Bu amaçla harç kalıba yerleştirildikten hemen sonra,

harcın yüzeyine parafin emülsiyonu püskürtülmüştür. Parafin emülsiyonu, yüzeyin parafin tabakası ile kaplanmasını sağlamakta ve nem kaybını engellemektedir (Özer, Parlak, Sağlam ve Özkul, 2007). Şekil 6.44’de uygulama fotoğrafları görülmektedir. Parafin filminin oluşup oluşmadığı, kalıp yüzeyindeki tabaka sıyrılarak kontrol edilmiştir. Dış ortamda nem alışverişi kesilen örneklerin uç kalıpları hem mikro beton, hem de standart harç serileri için 3 saatte açılmıştır. Yan kalıplar nem kaybını engellemek için açılmamıştır. Mikro beton ve standart harç örneklerinin büzülme ölçümü sonuçları sırasıyla Şekil 6.45 ve 6.46’da sunulmuştur.

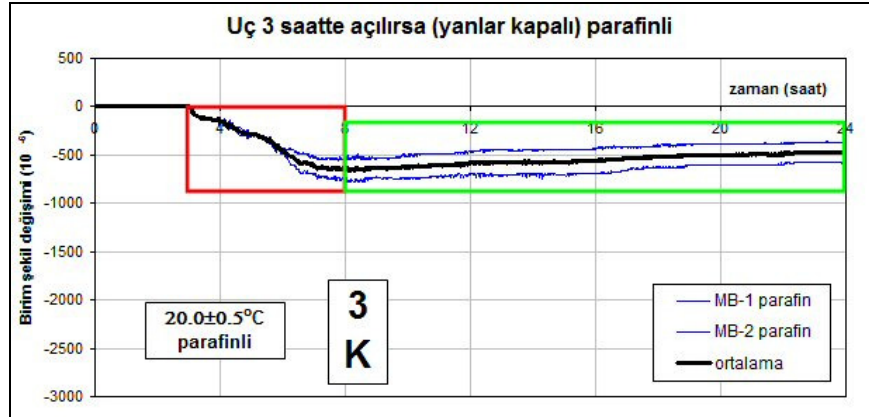


Şekil 6.44 Örnek yüzeylerine parafin emülsiyonu uygulaması ve yüzeyin parafin tabakası ile kaplandığının kontrolü.

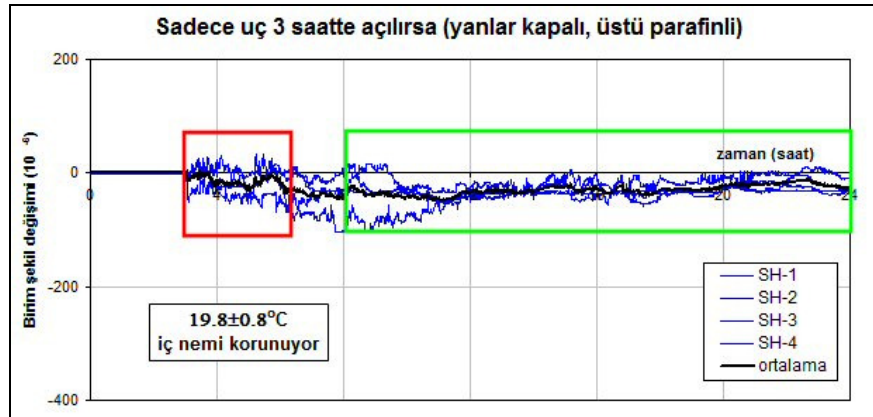
Şekli 6.45’den parafin kaplı mikro beton örneklerinin büzülme değeri $-487 \cdot 10^{-6}$ olarak okunmaktadır. Bu değer, örneğin nem alışverişi en aza indirildiği için “deneysel otojen büzülme değeri” olarak kabul edilebilir. Bölüm 6.2.7’de üstü açık örneklerin büzülme değerleri yardımı ile teorik hesaplama yoluyla belirlenen “teorik otojen büzülme değeri” ise $-399 \cdot 10^{-6}$ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar mikro betonun bir günlük otojen büzülme değerinin yaklaşık $-400-500 \cdot 10^{-6}$ mertebelerinde olduğunu göstermektedir. Eğer ortamla mikro beton arasında nem alışverişi varsa, büzülme değeri açık yüzey oranına ve ortam nem-sıcaklık özelliklerine göre $3000 \cdot 10^{-6}$ ’ya kadar çıkabilmektedir.

Şekli 6.46’da verilen parafin kaplı standart harç örneklerinin büzülme değerleri incelendiğinde, bazı örneklerde hemen hemen hiç büzülme olmadığı lokal genleşme davranışlarının olduğu görülmektedir. Parafin kaplı harç örneklerinde ortalama büzülme değeri (deneysel otojen büzülme) $-28 \cdot 10^{-6}$ gibi çok küçük mertebededir.

Diğer taraftan Bölüm 6.2.5’de üstü açık örneklerin büzülme değerleri yardımı ile teorik hesaplama yoluyla belirlenen “teorik otojen büzülme değeri” ise, standart harç için $-174 \cdot 10^{-6}$ olarak hesaplanmıştır. S/Ç oranı 0,50 olan ve mikro betona kıyasla çok daha az miktarda çimento içeren standart harçlarda otojen büzülmenin, yaklaşık $-30 \cdot 10^{-6}$ mertebelerinde olduğu söylenebilir.



Şekil 6.45 Parafin kaplı mikro betonların büzülme davranışı.



Şekil 6.46 Parafin kaplı standart harçların büzülme davranışı.

6.2.12 Yöntemin Genel Olarak Değerlendirilmesi

İlk 24 saatte yarı-katı hale geçişten sonraki büzülmenin ölçümüne yönelik olarak geliştirilen deney yöntemi pek çok farklı örnek üzerinde uygulanmıştır. Yöntem farklı malzemelerde zamanla meydana gelen hacimsel değişimleri hassas bir şekilde ölçme imkanı sağlamaktadır. Deneylerden elde edilen sonuçlar ışığında yöntemin bazı avantaj ve dezavantajları şu şekildedir:

6.2.12.1 Yöntemin Avantajları

- Örneğe müdahale etmeden ve ölçüm yüzeyine zarar vermeden boy değişimi ölçümüne olanak sağlamaktadır.
- Aynı anda 5 örneğe kadar ölçüm yapabilme imkanı vermektedir. Böylece aynı karışımın performansı birkaç örnekten alınan verilerle incelenebilmektedir.
- Boy değişimi verileri ile eş zamanlı olarak sıcaklık ve nem değişimi takibine imkan sağlamaktadır. Sıcaklık ve nemin boy değişimine etkisi belirlenebilmektedir.
- Oturma ile boy değişimini eş zamanlı ölçebilmektedir. Oturmanın durması ile akıcı kıvamdan yarı-katı hale dönüş arasında ilişki kurulabilir.
- Farklı kalıp açma stratejileri ile elde edilen büzülme değerleri kullanılarak, örneklerin otojen büzülme ve nem kaybından kaynaklanan büzülme değerleri birbirinden ayırt edilebilir. Deneysel olarak doğrudan otojen büzülme değerleri belirlenebilir.
- S/Ç oranı, katkı dozajı gibi temel tasarım parametrelerinin erken yaşlardaki büzülme davranışına etkileri bu yöntemle incelenebilir.

6.2.12.2 Yöntemin Dezavantajları

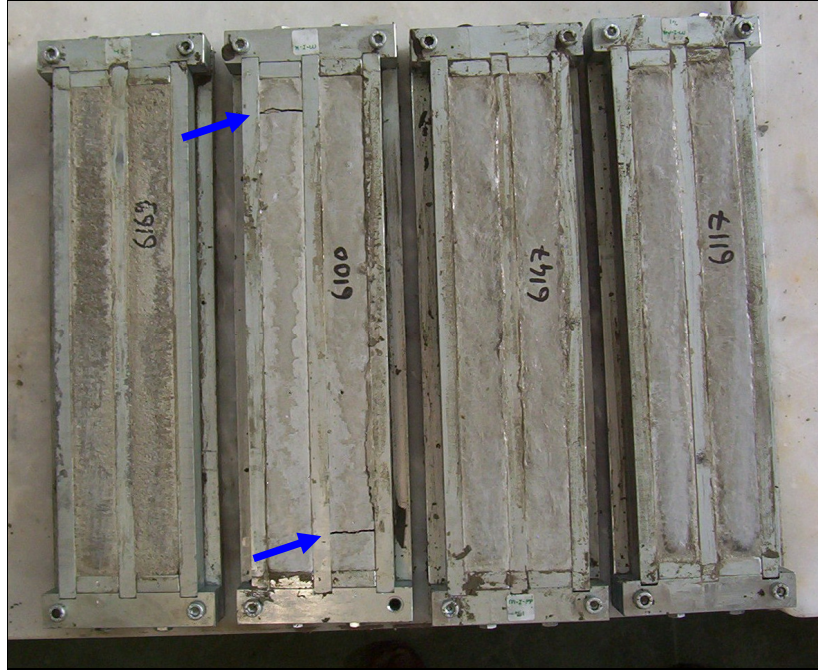
- Geliştirilen yöntemle örneğin boy değişimi henüz kendi kendini tutacak hale gelmeden ölçülememektedir. Aslında özellikle kendiliğinden yerleşen mikro beton gibi akıcı kıvamdaki örneğin boy değişimini ilk saatlerde izlemek çok da sağlıklı olmadığından bu büyük bir kısıt olarak görülmemelidir.
- Uç ve yan kalıpların sökümü için gerekli sürenin örnekten örneğe değişmesi nedeniyle, geliştirilen yöntem ön deneme gerektirmektedir. Boy değişimi ölçümünün yanı sıra priz süresi ve oturma ölçümlerine de ihtiyaç duyulabilir.
- Uç ve yan kalıpların sökümü sırasında örneğin kırılarak veri alınamaması riski (özellikle yapışkan kıvamlı karışımlarda ve erken yan kalıp söküm sürelerinde) çok sayıda örnekle çalışılmasını gerektirmektedir. Bu tür yapışkan örneklerde sürtünme ne kadar azaltılmak istense de tam olarak etkisini gidermek mümkün olamamaktadır.

6.3 Mikro Betonun Kısıtlı Durumda Büzülme Çatlağı Hassasiyeti ve Sonuçlar

Standart harç, lifsiz MB %1,2 (KYMB), polipropilen lifli [PP%1 (MB %1,2)] ve polivinil alkol lifli [PVA%1 (MB %1,2)] karışımları kısıtlanmış durumda çatlak oluşumunu gözlemlemek için tekrar dökülmüştür. Ancak bu sefer kullanılan kalıpların uçlarına kalıba ankastre olan pimler takılmıştır. Uçlarından vidalanarak kısıtlanmış durumdaki örneklerin laboratuvar ortamında (%55-60 BN, 21°C), kalıp içinde 1 gün bekletildikten sonraki yüzey görünümleri Şekil 6.47’de verilmiştir. Gözle yapılan incelemede standart harç ve lifli mikro betonlarda herhangi bir çatlak oluşmadığı, ancak lifsiz mikro betonun vidaların en kalın kısımları olan bölgelerinden (matris için en dar kesitli bölge) çatladığı belirlenmiştir (Şekil 6.48). Benzer sıcaklık ve nem koşullarında serbest haldeki büzülmesi ölçülen lifsiz mikro betonun yaklaşık $1100 \cdot 10^{-6}$ ’lık birim büzülme yaptığı Şekil 6.34’de görülebilir. Bu birim büzülme değeri 295 mm uzunluğundaki örnekte yaklaşık 0,3 mm kısalma anlamına gelmektedir. Kısıtlı durumda büzülemeyen örnek bekleneneği üzere çatlamaktadır. Lifli örneklerde de serbest haldeki büzülme değerleri lifsiz mikro betona benzediği halde, kısıtlı durumda gözle görülür çatlak tespit edilememiştir. Bu durum liflerin çatlağı yayarak, genişliğini gözle görülür mertebelerin altına indirdiğini göstermektedir. Literatürde kısıtlı durumda lifli kompozitlerdeki maksimum çatlak genişliği için 40-50 mikron değerleri rapor edilmiştir (Zhou, Li, Ye, Schlangen, Breugel ve Li, 2008). Lifler çatlak yayıcı ve/veya sönümleyici bir görev görmektedir.

Lifsiz mikro betonun büzülme hassasiyeti suya doymun küre azaltılarak erken yaşta çatlak riski azaltılabilir. Yapılan denemelerde lifsiz mikro betonların dökümden sonra, yüzeylerinden nem kaybını önleyecek şekilde korunursa kısıtlı durumda çatlak meydana gelmediği belirlenmiştir. Bölüm 6.2.11’de parafin uygulaması ile nem alışverişi engellenen mikro beton örneklerinde söz konusu farklılık ortaya konulmuştur. Bu koruma yaş bezle mikro beton yüzeyini örtüp, plastik poşet içinde nem alış verişinin engellenmesi ile sağlanabilir. Lifsiz mikro betonların erken yaşlarda çatlak riskinin çok iyi bir yalıtım yapılmadan engellenemeyeceği kanıtlanmıştır. Lifsiz mikro betonların erken yaşta küre hassaslığı otojen büzülme değerlerini yüksekliğinden kaynaklanmaktadır. Ancak çatlamının kaynağında

kuruma etkisi bulunmaktadır. İlk 8 saatteki yüksek otojen büzülmenin yanı sıra bir de kuruma büzülmesi katılınca, mikro betonların kısıtlı durumda çatlaması kaçınılmazdır. Lif kullanmak veya farklı alternatifler (polimer katkıları) çatlama riskini azaltıcı işlev görmeleri açısından kesinlikle önerilmektedir. Ancak erken yaşlarda etkili kür de ihmal edilmemelidir.



Şekil 6.47 İki uçtan vidalarla kısıtlı örnekler. Soldan sağa: standart harç, MI matrisli mikro beton, PP lifli MI matrisli MB, PVA lifli MI matrisli MB.



Şekli 6.48 Lifsiz mikro beton örneklerin en dar kesitlerinden çatlaması.

BÖLÜM YEDİ

MİKRO BETON TASARIM KRİTERLERİ, SONUÇLAR ve GENEL DEĞERLENDİRME

Bu bölümde deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ışığında, genel bir değerlendirme yapılarak, mikro beton tasarımında dikkate alınması gereken kriterler verilmiştir. Hedefe yönelik olarak, mikro betonun reolojik özelliklerinin ve tokluk performansının geliştirilmesi amacıyla, tasarımda yapılabilecek değişiklikler ile olası etkileri yorumlanmıştır. Ayrıca performans incelemelerinde kullanılan, bir kısmı bu tez kapsamında geliştirilen deney yöntemlerinin (video kameralı yayılma çapı gelişimi ölçümü, bilyeli reometre, mini-plaka yöntemi, boncuk yöntemi, lazer sensörlü büzülme ölçüm yöntemi) avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiştir. Son olarak tez kapsamında incelenemeyen, ancak incelenmesinde yarar olacağı düşünülen konularla ilgili öneriler sunulmuştur.

Genel değerlendirme üç ayrı başlıkta yapılmış olup, ilk iki başlıkta incelenen performans kriterleri birbiri ile de yakından ilişkilidir. Şekil 7.1’de söz konusu performans kriterlerinin birbiri ile ilişkileri, tez kapsamında kullanılan malzeme ve yöntemler ışığında şematize edilmiştir.

7.1 Mikro Beton Tasarımında Reolojik Performans Kriterleri

- Mikro beton tasarımında kullanılan malzemelerin tane boyutunun çok küçük olması, reolojik davranışlarının harç veya beton gibi klasik malzemelerden farklılaşmasına neden olmaktadır. Mikro betonun taze haldeki tiksotropik yapısı; hem lif kabul edebilme potansiyelini olumsuz etkilemekte, hem de sertleşmiş haldeki mekanik özelliklerini olumsuz etkileyen “kaynaşma” problemine neden olmaktadır. Bu nedenle, mikro betonun reolojik özellikleri, Su/Çimento (S/Ç) oranı ve akışkanlaştırıcı katkı dozajı optimize edilerek, hem lif kabul edebilme potansiyeli geliştirilmiştir hem de tiksotropi derecesi minimize edilmiştir. Yapılan çalışmalarda tiksotropi derecesini en aza indirgeyen S/Ç oranı ve akışkanlaştırıcı katkı dozajı kombinasyonunun bu çalışmada incelenen mikro betonlar için sırasıyla 0,44 ve %1,2 olduğu belirlenmiştir.

- Liflerin mikro beton matrisinde topaklaşmaksızın dağılmalarında kullanılan mikro agrega boyutunun ve lif dozajının önemi çok büyüktür. En büyük mikro agrega boyutunu 100 mikron ile sınırlamak matrisin lifi homojen bir şekilde kabul edebilmesinde avantaj sağlamaktadır. Lif dozajı artışı mekanik performans açısından çok önemli iken, homojen olarak dağıtılamayan lif yüksek dozajda kullanılsa bile, amaçlanan performansa ulaşamayabilir. Ayrıca kullanılacak mikro agreganın piyasada bulunabilirliği, tasarımın ekonomik boyutunu önemli derecede etkileyeceğinden seçimde göz önünde bulundurulmasında yarar vardır. Öğütülmüş kireçtaşı tozunun farklı sektörlerde de sürekli olarak kullanılması ve bu malzeme ile yapılan deneylerde lif topaklaşmasının kuvars mikro agregalı matrislere kıyasla daha az meydana gelmesi, söz konusu malzemeyi ön plana çıkarmaktadır. Yapılan çalışmalarda MI matrisinin (Ağırlıkça çimento/su/mikro agrega oranı = 1/0.44/1 olan ve karışımdaki çimento ağırlığının %1.2'si oranında akışkanlaştırıcı katkı içeren matris) lif topaklaşmasını azaltma açısından en uygun olduğu belirlenmiştir.

- Çimento bazlı kompozitlerin taze haldeki reolojik davranışları; “*karıştırma başlangıcında*” ve “*akış hareketi sırasında*” farklılık göstermektedir. Reolojik parametrelerin söz konusu aşamalarda ölçümü, farklı yöntemlerle gerçekleştirilmekte olup, statik ve dinamik olarak iki gruba ayrılması mümkündür. Hem statik hem de dinamik reolojik parametreler çimento bazlı kompozitler için geliştirilen “bilyeli reometre sistemi” ile ölçülebilmektedir.

- Akışkanlaştırıcı katkı ilavesi mikro betonların hem statik Eşik Kayma Gerilmesi (EKG) değerini hem de başlangıç viskozitesini azaltmaktadır. Statik EKG değeri %1 oranında akışkanlaştırıcı katkı kullanımında 2000 Pa mertebelerinde iken, %1.4 oranında katkı kullanımında 100 Pa'nın altına inmiştir. Benzer şekilde başlangıç viskozitesi değeri katkı ilavesi ile 10.000 Pa.s 'den 200 Pa.s'ye kadar düşmüştür. Mikro betona lif ilavesi ise statik EKG değerini 2-3 kat arttırmaktadır. Bilyenin sürüklenme sırasında maruz kaldığı gerilmeyi arttıran lifler, başlangıç hareketini güçleştirmekte ve karıştırmayı zorlaştırmaktadır. Akışkanlaştırıcı kullanımı sayesinde liflerin işlenebilirliğe olumsuz etkisi önemli derecede azaltılmış, yüksek

S/Ç oranlı çimento hamuru veya S/Ç oranı 0,60 olan harç karışımlarına yakın statik EKG değerlerine ulaşılmıştır.

- Herschel Bulkley modeli, kuru kıvamlı karışımlar dışındaki çimento bazlı kompozitlerin akış sırasındaki reolojik davranışını modellemede oldukça yararlı bulunmuştur. Bu modelle karışımların “dinamik EKG değerleri” ve yüksek deformasyon hızlarında “plastik viskozite” ile ilişkilendirilebilecek “nihai viskozite” değerleri belirlenebilmektedir.

- S/Ç oranına bağlı olarak çimento hamurlarının dinamik eşik kayma gerilmesinin 56-477 Pa ve nihai viskozitesinin de 6-19 Pa.s aralığında olduğu belirlenmiştir. Yüksek S/Ç oranına sahip çimento hamurları hareket halinde ayrılmaya eğilimli, durgun halde ise akmaya dirençli bir davranış göstermektedir.

- Mikro betonların dinamik eşik kayma gerilmesi ise, katkı dozajına bağlı olarak 5-15 Pa ve nihai viskozitesi de 20-40 Pa.s aralığındadır. Mikro betonlardan elde edilen dinamik EKG değerleri, çimento hamurundan çok daha düşük iken, nihai viskozite değerleri, çimento hamuru karışımlarından daha yüksektir (S/Ç oranı 0,250 olan seri hariç). Mikro betonlarda kullanılan polikarboksilat kökenli akışkanlaştırıcı katkı, dinamik EKG’yi düşürürken, nihai viskoziteyi (η_{inf}) yüksek deformasyon hızlarında bile yüksek tutmaktadır.

- Mikro betonda düşük eşik kayma gerilmesine rağmen, nihai viskozitenin yüksek deformasyon hızlarında bile yüksek kalması, kullanılan akışkanlaştırıcıya bağlanmıştır. Uzun yan zincirli polikarboksilat kökenli katkılar taneciklerin etrafını sararak, tanecikler etrafında steirik itki meydana getirmektedir. Hareket halinde mikro beton tanecikleri etrafındaki katkı zincirleri yönlendirilerek, dinamik EKG değerini düşürmektedir. Harekete dik yöndeki bağlı zincirler kopmaktadır. Ancak aynı anda tanecikler arasında kayma gerilmesinin daha az olduğu bölgelerde, polikarboksilat katkı zincirleri bağlayıcılık vazifesi görerek taneciklerin akışı topluca takip etmesine neden olmaktadır. Bu durum mikro betonlarda EKG’nin düşerken, viskozitenin neden yüksek kaldığını açıklamaktadır. Uygun katkı dozajının

kullanılması halinde katkılı mikro betonlarda gözlenen “*sakızlanarak akma*” davranışı söz konusu mekanizmaya bağlanmıştır. Pasif bölgedeki katkıların, hareket halindeki tanecikler arasında köprüleme görevi üstlenerek, bilyenin kolayca sürüklenmesini engellemesi, viskozitenin korunmasını sağlamaktadır. Böylece mikro beton yüksek deformasyon hızlarında (pompalama gibi) stabilite açısından, katkısız çimento hamuruna kıyasla avantaj sağlamaktadır. Uygun dozaj aralıklarında çalışılırsa kendiliğinden yerleşebilirliğin anahtarı olan uygun plastik viskozite sağlanmış olacaktır.

- Çimento harcının dinamik reolojik parametreleri incelendiğinde, S/Ç oranı 0,60 olan karışım için dinamik EKG değerinin 6 Pa ve nihai viskozite değerinin 2 Pa’a kadar düştüğü tespit edilmiştir. S/Ç oranı yüksek olan harçta, düşük viskoziteli çimento hamurunun agrega tanelerini şiddetli dinamik etki altında taşıyamadığı belirlenmiştir. Yüksek deformasyon hızlarında, çimento harcı ayrışmaya eğilimlidir.

- Mikro betona lif ilavesi tüm dinamik reolojik parametrelerde artışa neden olmaktadır. Liflerin sürüklenen bilyenin etki ettiği aktif gerilme bölgesini genişlettiği tespit edilmiştir. Bilyenin içinde sürüklendiği malzemede bulunan katı cisimlerin miktar, boyut ve geometrileri aktif gerilme alanını genişletmektedir. Uzun bir lif, bilyenin matriste etkileyeceği aktif alanı kısa bir life göre çok daha fazla arttırmaktadır. Benzer şekilde lif dozajı da arttıkça aktif alan artmaktadır. Yapılan reolojik incelemeler, PVA liflerin PP ve YYPE liflere kıyasal işlenebilirliği daha az etkilediğini göstermiştir. Lifli mikro beton karışımlarının kendiliğinden yerleşebilirlik özelliği, reolojik parametrelerin ölçümü ile belirlenebilmektedir. Ancak, lif özellikleri ve lif dozajı bu özellikleri farklı oranlarda değiştirdiği için kendiliğinden yerleşebilirlik için kesin değerler vermek doğru değildir. Farklı malzemeler ve bunların oranları için optimum değerler istatistiksel açıdan anlamlı sayıda örnek üzerinde yapılacak sistematik deneyler sonucu belirlenmelidir. Bazı durumlarda lif-matris kombinasyonuna bağlı olarak kendiliğinden yerleşebilirliğe ulaşmak mümkün olamamaktadır. Bu durumdaki lifli karışımlar mutlaka bir miktar sıkıştırma enerjisi uygulanarak yerleştirilmelidir.

- Lifli mikro betonlarda akışkanlaştırıcı katkı dozajı artırılarak veya S/Ç oranı artırılarak plastik viskozitenin aşırı derecede düşürülmesi, mikro betonun lifi taşıyabilme potansiyelini olumsuz yönde etkileyerek ayrışmaya yol açacağından tercih edilmemelidir. Bu çalışmada incelenen karışımlarda, akma eğrileri yardımıyla belirlenen plastik viskozitenin 10 Pa.s'nin altına inmesi halinde ayrışma potansiyelinin ortaya çıkacağı belirlenmiştir.

7.2 Mikro Beton Tasarımında Eğilme Etkisi Altındaki Performans Kriterleri

Eğilme etkisi altında yük-sehim grafikleri yardımıyla performansları incelenen mikro beton karışımlarında şu temel bulgulara ulaşılmıştır:

- Lif dozajının artırılması eğilme dayanımı ve eğilme tokluğunu lif-matris kombinasyonuna bağlı olarak farklı mertebelerde arttırmıştır. Lif içermeyen kontrol örneklerinde 28 günlük eğilme dayanımı 6-10 MPa mertebelerinde iken, özellikle hacimce %2 oranında PVA rec15 lifi katılan örneklerin eğilme dayanımları 20 MPa'a yaklaşmaktadır. Benzer şekilde eğilme toklukları (açıklığın 1/100'ü olan 1.3 mm sehim değerine kadar yük-sehim eğrisi altında kalan alan) %2 oranında PVA rec15 lif ilavesi ile 100 N.m'den 5000-6000 N.m'ye yükselmiştir.

- Her lif-matris kombinasyonunun kendine özgü yük-sehim eğrisi bulunmaktadır. Özellikle PP liflerin kullanıldığı kompozitlerde liflerin sıyrılarak, küçük çaplı ve kısa PVA liflerin kullanıldığı kompozitlerde liflerin koparak göçtükleri yapılan ayrıntılı incelemelerle ortaya konulmuştur.

- Yük-sehim eğrilerinde ilk çatlaktan sonra yük düşme oranı ve çatlağın görünür genişlikte açılma olasılığı düşük lif dozajlarında, düşük dayanımlı liflerde ve zayıf matrislerde daha fazladır. PP liflerin kullanıldığı kompozitlerde ilk çatlak sonrası ani yük kaybı oranı %50'ye kadar çıkmaktadır. Buna göre, PP liflerin performansı diğer liflere göre daha kötüdür.

- Eğilme tokluğu açısından zayıf matrisler (uçucu kül katkılı ve kuvars mikro agregalı) bazı istisnai örneklerin dışında, güçlü matrislere göre daha kötü performans vermektedir. Ancak kireçtaşı tozlu serilerde tokluk performansı, kuvars mikro agregalı serilere kıyasla çoğunlukla daha iyidir. Liflerin topaklaşması potansiyelinin daha az olması, söz konusu performans farkının nedeni olarak görülmektedir.

- Yüksek dayanımlı liflerin kullanıldığı mikro betonlarda, orta nokta yüklemesi ile eğilme deneyi yapılmasına rağmen, çoklu çatlak potansiyeli gözlemlemek mümkündür. YYPE liflerde %1 lif dozajı çoklu çatlak potansiyeli için yeterli olurken, PVA liflerde %1 kullanım oranı çoklu çatlak potansiyeli için her zaman yeterli olmamakta, %2 kullanım oranı daha avantajlı görünmektedir. Birden fazla kesitin açılması yükleme sırasında, yük köprüleyen lif sayısını önemli derecede arttırdığı için, kompozitin tokluğunda çoklu çatlak mekanizması ile büyük artışlar kaydedilmektedir.

- Liflerin yüzey özellikleri mevcut durumları da dikkate alınarak, amaca yönelik olarak modifiye edildiğinde hem çoklu çatlak potansiyelinin arttırılması hem de eğilme tokluğunun geliştirilmesi mümkün olmaktadır.

- Performansı arttırmak amacıyla lif yüzey özellikleri dikkate alınarak PP ve YYPE lifler için farklı, PVA lifler için farklı yüzey modifikasyonu yöntemi kullanılmıştır. PP ve YYPE liflerin pürüzsüz ve hidrofob yüzeyleri, farklı güç ve uygulama sürelerinde argon ve oksijen plazması etkisi ile, değişik oranlarda pürüzlü ve hidrofil hale dönüştürülmüştür. Bu değişim PP lifli kompozitlerde %1 kullanım oranında bazı serilerde çoklu çatlak oluşumu potansiyelinin gözlenmesini sağlamıştır. Ayrıca PP liflerin ilk çatlak sonrası sıyrılma yoluyla taşıdığı yük seviyesini, önemli derecede artırarak toklukta gelişme kaydedilmesine imkân vermiştir. PP lifler için tokluğu ve eğilme dayanımını en olumlu etkileyen plazma koşulu 120W – 2 dakika argon plazması olarak belirlenmiştir. Tokluk ve eğilme dayanımı değerleri plazma işlemi görmemiş PP lif içeren kompozitlere kıyasla %80-85 oranında artmıştır. YYPE liflerine de aynı modifikasyon yöntemi uygulanmıştır. Liflerin yüzeylerinde plazma uygulaması sonucu meydana gelen fiziksel ve kimyasal

değişiklikler, %1 YYPE lifi katkılı kompozitte gözlenen çoklu çatlak sayısını arttırmış ve çatlağın örnekte yayıldığı bölgenin genişlemesine neden olmuştur. Bu değişiklikler eğilme tokluğunu arttırmıştır. YYPE lifli kompozitlerde tokluğu %35 ve eğilme dayanımını %27 oranında arttıran 180W – 30 dakika argon plazması koşulunun en etkili olduğu yapılan deneylerle ortaya konulmuştur. Ancak plazma uygulamasının türüne göre aşırı şiddette olması veya yetersiz kalması halinde, kompozit performansının olumsuz etkilendiği ya da performansta belirgin bir değişiklik gözlenmediği de belirtilmelidir (Örneğin 180W – 30 dakika oksijen plazması). Liflerin yüzeyinde meydana gelen aşırı dağlanma, lifin kesitini azaltmakta, yüzeyinde çentikler açarak çekme etkisindeki performansını olumsuz etkilemektedir. Plazmanın gücü ve uygulama süresi, plazma türüne ve uygulanacağı lif türüne göre optimize edilmelidir.

- PVA lifler yüzey yapısı nedeniyle çimento bazlı matris ile güçlü bir aderans oluşturmakta ve yüksek eğilme dayanımlarına ulaşılmasını sağlamaktadır. Burada liflerin yüksek mekanik özellikleri de önemli rol oynamaktadır. İncelemelerde kullanılan PVA rec 15 lifinin çekme dayanımı 1600 MPa, elastisite modülü ise 42 GPa'dır. Ancak liflerin söz konusu yüksek aderansı nedeniyle kopması ile en büyük eğilme yükü sonrasında, sehim artışı ile birlikte hızlı bir yük düşüşü görülmektedir.

- PVA liflerin yüzey özellikleri, diğer liflere kıyasla daha farklı olduğu için, bu liflerde kompozit tokluğunu arttırmak üzere önce plazma uygulaması ardından lif yüzeylerini yağlama yoluna gidilmiştir. Bu şekilde yağ moleküllerinin lif yüzeyine bağlanması ve matrise karışmadan lifi matris içinde kaydırıcı vazife görmesi hedeflenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda plazma sonrası yağlanmış lifli kompozitlerin tokluğunun, plazma gücü ve süresine bağlı olarak arttırılabileceği belirlenmiştir. Çoklu çatlak davranışını ve tokluk değerini en fazla arttıran yağlama öncesi plazma koşulları, 180W - 30 dakika oksijen plazması ve 60W - 8 dakikalık argon plazmasıdır. Söz konusu koşullarda tokluk değerinde, yağlanmış kontrol lifli örneğe göre %50'den fazla artış kaydedilmiştir.

7.3 Mikro Beton Tasarımında Boyutsal Stabilite Açısından Liflerin Önemi

Lifsiz mikro betonların gerek erken yaşlarda gerekse uzun vadede büzülme açısından hassasiyeti ayrıntılı incelemelerle tespit edilmiştir. Erken yaşlarda lifsiz mikro betonda meydana gelen toplam büzülmenin kaynağı; otojen büzülme ve nem kaybı ile oluşan büzülme olarak ikiye ayrılmıştır. Lifsiz mikro betonların erken yaşlardaki toplam büzülme değerleri çimento harcına kıyasla çok daha fazla bulunmuştur. Kullanılan yönteme göre değişmekle birlikte, mikro betonların serbest büzülme değerleri çimento harcından 2-5 misli daha fazladır. Olumsuz ortam koşullarında bu farklılık daha da belirginleşmektedir. Kısıtlı durumda söz konusu büzülmenin çatlamaya neden olacağı deneysel olarak belirlenmiştir. Eğer erken yaşlarda mikro betonun nem kaybı engellenirse, söz konusu büzülmenin sadece otojen büzülme ile sınırlı kalacağı ve çatlak hassasiyetinin etkili kür ile azaltılabileceği ortaya konulmuştur. Diğer taraftan lifli mikro betonların da gerek erken yaşlarda, gerekse uzun vadede serbest büzülme değerlerinin lifsiz mikro betonlarla benzer olduğu ve liflerin serbest büzülmeyi azaltıcı etkisi olmamasına karşın, kısıtlı durumdaki mikro betonda çatlamayı engellediği belirlenmiştir. Aslında bu durum lifli kompozitlerin eğilme etkisi altında sergiledikleri çoklu çatlak davranışı ile yakından ilişkilidir. Lifli mikro betonların kompozitte tekil çatlak oluşumuna karşı direnci artırması şu mekanizmalarla açıklanmıştır:

- Liflerin çekme etkisinde kompozitin deforme olma potansiyelini arttırması,
- Liflerin çatlağı meydana getirecek parazit gerilmeleri kompozit geneline yayarak sönümlemesi,
- Liflerin oluşacak çatlağı da kesite yayarak çatlak sayısını arttırmasına rağmen çatlak genişliğini sınırlandırması,
- Yük etkisi altında açılan çatlak genişliklerinin çok küçük olması, yük kaldırılınca bu çatlakları köprüleyen lifin elastik davranışı nedeniyle çatlağı tekrar kapatması.

Lifler yukarıda sıralanan mekanizmalar yardımı ile mikro betonun büzülme kaynaklı çatlama problemlerini önemli derecede azaltmaktadır.

7.4 Performans İncelemelerinde Kullanılan Deney Yöntemlerinin Avantaj ve Dezavantajları

7.4.1 Video Kameralı Yayılma Çapı Gelişimi Ölçümü

Bu yöntemle akıcı özellikteki çimento esaslı kompozitlerin yayılma çapının zamana bağlı gelişimi kaydedilerek, karışımın reolojik davranışı karakterize edilebilmektedir. Böylece nihai yayılma değerinin yanı sıra yayılmanın hızı da ölçülebilmektedir. Akıcı olmayan kıvamdaki karışımlar bu yöntemle incelenememektedir. Nihai yayılma değeri karışımın statik eşik kayma gerilmesi, belli bir yayılma çapına ulaşma süresi de karışımın plastik viskozitesi ile ilişkilendirilebilir. Elde edilen sonuçlar yardımıyla karışımların reolojik özelliklerini birbiri ile karşılaştırmak mümkündür. Ancak reolojik büyüklüklerin gerçek değerlerini ölçmek söz konusu değildir. Yöntemin bir diğer kısıtı da karışımların statik reolojik büyüklükleri hakkında fikir vermesidir. Farklı deformasyon hızlarındaki davranışı bu yöntemle incelemek mümkün değildir.

Video kameralı sistemde yapılan gecikmeli yayılma çapı ölçümü, karışımların kısa süreli bekleme halinde kıvam kayıpları hakkında çok yararlı bilgiler vermektedir. Uygulamada sıkça karşılaşılabilecek olan, döküme kısa süreli ara verme uygulaması söz konusu yöntemle modellenmiştir. Karışımın tiksotropi derecesinin ani kıvam kaybına etkisi, bağıl yayılma çapı – zaman grafiklerinden rahatlıkla gözlenebilmektedir. Tiksotropi derecesini en aza indirmeye yönelik olarak en uygun S/Ç oranı ve katkı dozajı seçimi bu yöntemle yapılabilmektedir.

7.4.2 Bilyeli Reometre

Bilyeli reometrelerle, cihaz konfigürasyonunun izin verdiği geniş bir kayma gerilmesi aralığında (0-2850 Pa), farklı deformasyon hızlarında (0-35s⁻¹), en büyük tane boyutu 2 mm'ye kadar olan her türlü malzemeyi incelemek mümkündür. Yaklaşık 400 cm³ hacimde malzeme analiz için yeterli olmaktadır.

Bünyesinde katı tanecik barındıran süspansiyonların reolojik karakterizasyonunda kullanılan bilyeli reometre, çimento esaslı kompozitlerin incelenmesinde oldukça yararlı bulunmuştur. Çift tabakalı reometrelerle mümkün olmayan reolojik parametrelerin eldesi, bilyeli reometre yardımıyla dolaylı olarak elde edilmiştir.

Bilyeli reometre yardımı ile çimento hamuru ve harç ile mikro betonun davranış farklılıkları ayrıntılı incelemelerle ortaya konulmuştur. Bilyeli reometre yardımıyla bir karışımın başlangıç reolojik özellikleri (*hiçbir ön etki uygulanmadığı için örselenmemiş özellikleri denilebilir*) ve dinamik reolojik özellikleri (*bilyenin karışım içinde sürüklendiği temsili akış sırasındaki örselenmiş özellikleri denilebilir*) ayrı ayrı belirlenebilmektedir. Böylece sıkıştırılabilirlik, pompalanabilirlik, perdahlanabilirlik gibi farklı özelliklerin modellemelerinde, statik ve dinamik reolojik parametrelerin ayrı ayrı kullanılması mümkün olabilecektir.

Bilyeli reometrenin bir moment kolu yardımı ile reolojik özellikleri incelenen karışım içinde bilyeyi sürüklemesi, “kayma - slip” etkisinin ölçüm yapan karıştırıcılarla karışımın arasında yarattığı lokal ayrışmayı önemli ölçüde azaltmaktadır. Kendi eksenini etrafında bir turunu çok hızlı tamamlayan karıştırıcılarda (silindir veya konik formda) karışımın aynı bölgesi sürekli yüksek kayma deformasyonuna maruz kaldığı için “kayma - slip” etkisi ile karıştırıcı yüzeyinde su tabakası oluşmaktadır. Bu nedenle karışımın dinamik viskozitesi olduğundan çok daha düşük ölçülmektedir. Bilyeli reometrenin karışım içinde bir turunu tamamlaması sırasında sürüklendiği bölge karışım tarafından yeniden doldurulduğu için “kayma – slip” etkisi azalmaktadır.

Düşük S/Ç oranlı ve kuru kıvamlı harçlarda bilyeli reometre kullanımının uygun olmadığı söylenebilir. Başlangıç eşik kayma gerilmesi değeri 2450 Pa’dan yüksek olan karışımlarda bu çalışmada kullanılan reometre sınırları aşıldığı için çalışılamamaktadır. S/Ç oranı düşük ve kuru kıvamlı karışımlarda, rotasyonel reometreler yerine kapiler reometreler tercih edilmelidir.

Bilyeli reometre belli lif tipleri için, belli bir dozaja kadar lifli mikro betonların incelemesinde de kullanılabilir. Ancak özellikle boy/çap (L/D) oranı fazla olan lif tiplerinde ve yüksek lif dozajlarında kilitlenme meydana geldiği için kullanılmaları mümkün değildir.

7.4.3 Mini Plaka Yöntemi

Eğilme etkisi altında lifli mikro betonların performanslarının karşılaştırılmasında 40*40*160 mm ayrıtlı örnekler hazırlanıp, 130 mm açıklıkta ortadan tekil yükleme modu kullanılmıştır. Ancak mikro betonun plaka formundaki yapı elemanı olarak üretilmesi halinde, çok daha ince elemanların eğilme performanslarının belirlenmesi söz konusu olacaktır. Bu nedenle farklı bir kalıplama yöntemi ile “Mini Plakalar” hazırlanmış ve plaka örnekler açıklık ortasından tekil ve çift yükleme ile test edilmiştir. Aynı karışımlardan hazırlanan kare kesitli (40*40 mm) kalın örneklerle yapılan performans karşılaştırmalarından plaka yönteminin şu avantajları çıkartılmıştır:

- Farklı bir kalıplama sistemi kullanıldığı için perdahlama olayı ortadan kalkmaktadır. Bu nedenle “Mini Plaka” yöntemi ile yüksek lif dozajlarında kompozitlerin hazırlanması mümkün görünmektedir.

- Kompozitte bulunan liflerin mekanik özellikleri, plaka elemanların eğilme etkisi altındaki performansını belirgin şekilde değiştirmektedir. İnce elemanlarda, kalınlara kıyasla ilk çatlak yükü düşmektedir. İlk çatlaktan sonra devreye giren lifler, plaka örneklerde yük aktarımı için daha önemli hale gelmektedirler. Örneğin, bu çalışmada güçlü bir lif olan PVA’nın ilk çatlaktan sonraki etkinliği, zayıf bir lif olan PP’ye kıyasla mini plaka örneklerinin yük-sehim eğrilerinde çok daha belirginleşmektedir.

- Eğilme yüklemesinin açıklıkta çift noktadan yapılması durumunda, çoklu çatlak potansiyeli yüksek lifler (PVA rec7 veya rec15) kullanılırsa, plakada oluşan çatlak sayısı, tekil yüklemeye kıyasla önemli derecede artmaktadır. Diğer taraftan, PP lifli kompozitte aynı yükleme modu ile elde edilen yük-sehim eğrisi, kompozitte çoklu

çatlak oluşmadığını göstermiştir. Mini plaka yönteminde çift nokta yüklemesi yapılırsa, bir kompozitte çoklu çatlak potansiyeli olup olmadığı net bir şekilde ortaya konulmaktadır.

- İnce kesitlerde kısa sürelerde hidrate olmayan ürünlerin oranı, kalınlara kıyasla daha düşüktür. İyi kür yapılması halinde plaka formundaki örneklerin dayanım kazanma oranları daha yüksek olacaktır.

7.4.4 Boncuk Yöntemi

Erken yaşlarda çimento esaslı kompozitlerde yüzeysel büzülmenin ölçümüne yönelik olarak geliştirilen bir deney metodudur. Boncuk yöntemi ile kesitte meydana gelen aksinel büzülme ölçülememektedir, ancak farklı karışımların aynı koşullar altındaki büzülme miktarları karşılaştırılabilir. Boncuk yönteminde karışımda meydana gelen oturmalar ve boncuk merkezinin tespitindeki güçlükler, boncuklar arası mesafenin ölçümündeki değişkenliği arttırmaktadır. Boncuk yöntemi, video mikroskoplu ekstansometreler yardımıyla zamana bağlı veri alınarak geliştirilmeye açık bir yöntemdir.

7.4.5 Lazer Sensörlü Büzülme Ölçüm Yöntemi

Bu yöntemle erken yaşlarda çimento esaslı kompozitlerde meydana gelen aksinel büzülme, mikron hassasiyetli lazer sensörler ve yarı ankastre kalıp sistemi kullanılarak ölçülebilmektedir. Ölçüm sırasında henüz plastik kıvamda olan örnek yüzeyine temas edilmeden ölçüm yapılması, erken yaştaki büzülmenin sağlıklı bir şekilde ölçümü açısından yöntemin önemli bir avantajıdır. Ölçüm sonuçlarının zamana bağlı olarak kaydedilmesi, örnekteki boy değişimini izleme olanağı sağlamaktadır. Malzeme bileşenlerindeki değişkenliklerin ve ortam koşullarının toplam büzülme etkisi bu yöntemle incelenebilir. Ayrıca toplam büzülme, incelenen ortam koşullarındaki nem kaybı kaynaklı büzülme ve otojen büzülme deneysel olarak tespit edilebilmektedir. Lazer sensörlü büzülme ölçüm yönteminin en önemli dezavantajı, ölçüme başlama zamanının tespitine yönelik ön deneyler

gerektirmesidir. Priz başlangıç süresi veya oturma ölçümleri ile uç kalıp açma ve ölçüme başlama zamanının kullanılan bağlayıcı tipine bağlı olarak tespit edilmesi gerekmektedir. Yöntemin bir diğer sorunu da yapışkan özellikteki karışımlarda, kalıp yüzeyinin polyesterle kaplanıp yağlanmasına rağmen, zaman zaman karışımın kalıba yapışarak büzülme ölçümü alınmasını engellemesidir.

7.5 Yüksek Performanslı Mikro Beton Karışımlarının Olası Kullanım Alanları

Tez kapsamında geliştirilen MB karışımlar, reolojik özellikleri gereği kolay işlenebilir ve akıcı kıvamda üretilbildiklerinden, özellikle betonarme yapıların tamiri amacıyla kullanılabilir. Ayrıca uygulama kolaylığı ve çatlak açılmasına karşı dirençleri nedeniyle, beton yollarda yama malzemesi ya da derz dolgusu olarak kullanım olasılıkları bulunmaktadır. Mikro beton karışımlarının eğilme etkisi altında yüksek dayanımları ve tokluk performansları, betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanım alanı bulabileceklerini göstermektedir. Plaka formunda donatılı ya da donatısız prefabrike kompozitler hazırlanarak çeşitli güçlendirme uygulamalarında kullanılabilir. Tekrarlı darbe etkisindeki yapılarda, sönümleme özelliğinin gerektiği durumlarda ve ankraj uygulamalarında yüksek performanslı mikro beton karışımları uygulama alanı bulabilir. Yüksek performanslı mikro beton, servis ömrü boyunca dış etkilere maruz kalan yapılarda, çeşitli dış etkilere dolayı çatlak oluşumunu kısıtlayıcı özelliği nedeniyle, durabilite açısından da avantaj sağlayacaktır.

7.6 Gelecek Çalışmalara Yönelik Öneriler

Bu tez kapsamında incelenemeyen, ancak gelecekte incelenmesinde yarar görülen konularla ilgili öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- Mikro betonun matris fazında en yüksek Birim Hacim Ağırlık (BHA) değerini verecek tane boyut dağılımının, malzeme tane boyut dağılımlarından yararlanılarak teorik olarak belirlenmesi ve deneysel olarak sınanması yapılabilir. Ancak mikronize boyuttaki malzemelerin sadece tane boyutu ve şekli gibi fiziksel özelliklerinin değil, yüzey elektriksel yüklerinin de sıkışabilirliklerinde önemli rol oynadığı

düşünüldüğünde, yapılacak teorik hesaplamalarda söz konusu elektriksel yüklerin de dikkate alınması gerekmektedir. Ayrıca tasarımda kullanılan etkili akışkanlaştırıcılar tanecikler arasındaki etkileşimi önemli derecede değiştirmekte, dolayısıyla sıkıştırılabilirlikte rol oynamaktadır.

- Yüksek dozajda lif içeren mikro betonların taze haldeki reolojik özellikleri klasik reometrelerle belirlenememektedir. Bu tür karışımların davranışı kapiler reometrelerle veya ekstrüzyon reometreleri ile karakterize edilebilir.

- Lifli mikro beton kompozitlerin çoklu çatlak performansını etkileyen, ancak bu tez kapsamında incelenemeyen bir başka parametre de örnekteki rastgele dağılmış kusurların istatistiksel olarak yayılma derecesidir. Kompozit bünyesindeki kusuru homojen olarak yaymak çoklu çatlak olasılığını arttıracığından, tasarımda hafif mikro agrega (örneğin genişletilmiş mikronize perlit veya mikronize polimer tanecikleri) kullanımının etkisi incelenebilir.

- Lifli mikro beton tasarımlarında, boyut etkisinin varlığı “mini plaka” deneyleri ile ortaya konulmuştur. Elde edilen bulgular, bu tür kompozitlerin büyük ölçekli prototip üretimleri halinde performans farklılıkları ile karşılaşılabilirliğini göstermektedir. Prototip deneyleri sonucu elde edilen güvenilir malzeme parametreleri ile betonarme hesapların geliştirilmesi ayrı bir araştırma konusu olarak önerilebilir. Büyük ölçekli üretimde benzer performans için lif boyutunda değişikliklere gidilmesi gerekebilir.

- Mikro beton tasarımlarının büzülme potansiyelini azaltmak amacıyla otojen büzülme dolaylı yollardan engelleyici malzemeler (örneğin suya doymun hafif mikronize agrega kullanımı, süperabsorbent polimer kullanımı veya iç nemi koruma amacıyla yüzeyel kaplama) tasarımda kullanılabilir.

- Çatlak genişliğini kısıtlayan özelliği nedeniyle söz konusu malzemenin çeşitli iklim koşullarında dayanıklılığının üst düzeyde olması beklenir. Ancak lifli mikro betonların dayanıklılık özellikleri mutlaka incelenmelidir.

KAYNAKLAR

ACI 116R (2000). Cement and Concrete Terminology, *Manual of Concrete Practice*. American Concrete Institute. Farmington Hills, MI.

ACI 318M (1999). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. *Manual of Concrete Practice*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

Achour, K., Zenati, N. ve Laga, H. (2001). Contribution to image and contours restoration. *Real-Time Imaging*, 7 (4), 315–26.

Ahmed, S. F. U., Maalej, M. ve Paramasivam, P. (2007). Flexural responses of hybrid steel–polyethylene fiber reinforced cement composites containing high volume fly ash. *Constr Build Mat*, 21 (5), 1088-97.

Ahmed, S. F. U., Mihashi, H. ve Suzuki, S. (2006). Mechanical Properties of Hybrid PVA Fibre Reinforced Cementitious Composites under Bending. *1st International Structural Specialty Conference*, Calgary, Alberta, Canada, May 23-26, 10p.

Aiad, I. (2003). Influence of time addition of superplasticizers on the rheological properties of fresh cement pastes. *Cem Concr Res*, 33 (8), 1229–1234.

Aiad, I., Mohammed, A. A., ve Abo-El-Enein, S. A. (2003). Rheological properties of cement pastes admixed with some alkanolamines. *Cem Concr Res*, 33(1), 9 –13.

Akçay, B. ve Taşdemir, M. A. (2006). Influence of Lightweight Aggregates on Internal Curing and Fracture of Concrete. *International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete*. 20-23 August, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 31-40.

Akçay, B. ve Taşdemir M. A. (2008). Optimisation of using lightweight aggregates in mitigating autogenous deformation of concrete. *Const Build Mat*, 23 (1), 353-363.

Akkaya, Y. Ouyang, C. ve Shah, S. P. (2007). Effect of supplementary cementitious materials on shrinkage and crack development in concrete. *Cem Concr Comp*, 29 (2), 117-123.

Aldridge, W. W. ve Bren, J. E. (1970). Useful Techniques in Direct Modeling of Reinforced Concrete Structures, V.24, *ACI Special Publication*, 125-140.

Altable, V.F. ve Casanova, I. (2006). Influence of mixing sequence and superplasticiser dosage on the rheological response of cement pastes at different temperatures. *Cem Concr Res*, 36 (7), 1222-1230.

Aly, T., Sanjayan, J. G., ve Collins, F. (2008). Effect of polypropylene fibers on shrinkage and cracking of concretes. *Materials and Structures*, 41 (12), 1741–1753.

Aly, T. ve Sanjayan, J.G. (2008). Factors contributing to early age shrinkage cracking of slag concretes subjected to 7-days moist curing. *Materials and Structures*, 41 (4), 633–642.

Androsch, R. (2008). In Situ Atomic Force Microscopy of the Mesomorphic-Monoclinic Phase Transition in Isotactic Polypropylene. *Macromolecules*, 41 (3), 533-535.

Asad, M., Baluch, M. H. ve Al-Gadhib, A. H. (1997). Drying shrinkage stresses in concrete patch repair systems. *Magazine of Concr Res*, 49 (181), 283- 293.

ASTM C 187 (2002). *Standard test method for normal consistency of hydraulic cement*. Annual book of ASTM standards, USA.

ASTM C 305 (2004). *Mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency*. Annual book of ASTM standards, USA.

ASTM C 348 (2004). *Flexural strength of hydraulic cement mortars*. Annual book of ASTM standards, USA.

ASTM C 349 (2004). *Compressive strength of hydraulic cement mortars (using portions of prisms broken in flexure)*. Annual book of ASTM standards, USA.

ASTM C 490 (2008). *Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete*. Annual Book of ASTM Standards, USA.

ASTM C 618 (2003). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. Annual Book of ASTM Standards, USA.

ASTM D 4541 (2002). *Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers*. Annual Book of ASTM Standards, USA.

Atapattu D. D., Chabra R. P. ve Uhlherr, P. H. T. (1995). Creeping sphere motion in Herschel-Bulkley fluids: flow field and drag. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 59 (2-3), 245-265.

Azeredo, G., J.-C., Morel, C.-H. ve Lamarque. (2008). Applicability of rheometers to characterizing earth mortar behavior. Part I: experimental device and validation. *Materials and Structures*, 41 (8), 1465-1472.

Banfill, P. ve Frias, M. (2007). Rheology and conduction calorimetry of cement modified with calcined paper sludge. *Cem Concr Res*, 37 (2), 184–190.

Beaulne, M. ve Mitsoulis, E. (1997). Creeping motion of a sphere in tubes filled with Herschel-Bulkley fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 72 (1), 55-71.

Barnes, H. A., Hutton, J. F. ve Walters, K. (1989) *An Introduction to Rheology*. Elsevier Science, Amsterdam.

Banthia, N. ve Gupta, R. (2006). Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. *Cem Concr Res*, 36 (7), 1263–1267.

Banthia, N. ve Gupta, R. (baskıda). Plastic shrinkage cracking in cementitious repairs and overlays. *Materials and Structures*. doi: 10.1617/s11527-008-9403-9.

Baradan, B. (2000). *Yapı malzemesi II* (6. Baskı). İzmir: D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Yayınları.

Barboza, A. S. R., El Debs, M. K. ve Soares, A. M. M. (2002). An Alternative Material for Bearing Pad in Precast Concrete Connections. *Proceedings of the 17th BIBM - International Congress of Precast Concrete Industry*. Istanbul, Turkish Precast Concrete Association.

Barcelo, L., Moranville, M. ve Clavaud, B. (2005). Autogenous shrinkage of concrete: A balance between autogenous swelling and self-desiccation. *Cem Concr Res*, 35 (1), 177-183.

Barluenga, G. ve Hernandez-Olivares, F. (2007). Cracking control of concretes modified with short AR-glass fibers at early age. Experimental results on standard concrete and SCC. *Cem Concr Res*, 37 (12), 1624-1638.

Baudez, J.-C. (2006). About peak and loop in sludge rheograms. *Journal of Environmental Management*, 78 (3), 232–239.

Bauer, E., de Sousa, J. G. G., Guimaraes, E. A. ve Silva, F. G. S. (2006). Study of the laboratory Vane test on mortars. *Building and Environment*, 42 (1), 86-92.

Bentz, D. P. ve Jensen, O. M. (2004). Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking. *Cem Concr Comp*, 26 (6), 677-685.

Bentz, D. P. (2006). Influence of Shrinkage-Reducing Admixtures on Early-Age Properties of Cement Pastes. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4 (3), 423-429.

Besq, A., Malfoy, C., Pantet, A., Monnet, P. ve Righi, D. (2003). Physicochemical characterisation and flow properties of some bentonite muds. *Applied Clay Science*, 23 (5-6), 275– 286.

Beushausen, H.-D. ve Alexander, M. G. (2007). Performance of concrete patch repair systems. *Advances in Construction Materials*, Part III, Springer Berlin Heidelberg 255-262.

Beyea, S. D., Balcom, B. J., Bremner, T. W., Prado, P. J., Cross, A. R., Armstrong, R. L., ve diğer. (1998). The influence of shrinkage-cracking on the drying behaviour of White Portland cement using Single-Point Imaging (SPI). *Solid State Nuclear Magnetic Resonance*, 13 (1-2), 93-100.

Bigas, J.-P. ve Gallias, J.-L. (2003). Single-drop agglomeration of fine mineral admixtures for concrete and water requirement of pastes, *Powder Technology*, 130 (1-3), 110-115.

Bikard, J., Menard, P., Peuvrel-Disdier, E. ve Budtova, T. (2006). 3D numerical simulation of the behaviour of a spherical particle suspended in a Newtonian fluid and submitted to a simple shear. *Computational Materials Science*, 37 (4), 517-525.

Bouasker, M., Mounanga, P., Turcry, P., Loukili, A. ve Khelidj, A. (2007). Chemical shrinkage of cement pastes and mortars at very early age: Effect of limestone filler and granular inclusions. *Cem Concr Comp*, 30 (1) 13-22.

Braam, C. R., van der Ham, H. W. M. ve Koenders, E. A. B. (2006). Early-Age Shrinkage Control and Strength Development of Concrete. *International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete*. 20-23 August, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.

Brooks, J. J. ve Johari M. A. M. (2001). Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete. *Cem Concr Comp*, 23 (6), 495-502.

Burlion, N., Bourgeois, F. ve Shao, J.-F. (2005). Effects of desiccation on mechanical behaviour of concrete. *Cem Concr Comp*, 27 (3), 367–379.

Burrows, R. W., Kepler, W. F., Hurcomb, D., Schaffer, J. ve Sellers, J. G. (2004). Three simple tests for selecting low-crack cement. *Cem Concr Comp* 26 (5), 509-519.

Caszewski, J. G. ve Szwabowski, J. (2004). Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars. *Cem Concr Res*, 34 (2), 235–248.

Chang-wen, M., Qian, T., Wei, S. ve Jia-ping, L. (2007). Water consumption of the early-age paste and the determination of “time-zero” of self-desiccation shrinkage. *Cem Concr Res*, 37 (11) 1496-1501.

Chen, B. ve Liu, J. (2003). Effect of fibers on expansion of concrete with a large amount of high f-CaO fly ash. *Cem Concr Res*, 33 (10), 1549-1552.

Chen, T., Wu, Q. H., Torkaman, R. R. ve Hughes, J. (2002). A pseudo top-hat mathematical morphological approach to edge detection in dark regions. *Pattern Recogn*, 35 (1), 199–210.

Chopin, D., de Larrard, F. ve Cazaciu, B. (2004). Why do HPC and SCC require a longer mixing time? *Cem Concr Res*, 34 (12), 2237–2243.

Chougnet, A., Palermo, T., Audibert, A. ve Moan, M. (2008). Rheological behaviour of cement and silica suspensions: Particle aggregation modelling. *Cem Concr Res*, 38 (11), 1297-1301.

Colina, H. ve Acker, P. (2000). Drying cracks: Kinematics and scale laws. *Materials and Structures*, 33(3), 101-107.

Collepari, M., Borsoi, A., Collepari, S., Olagot, J. J. O. ve Troli, R. (2005). Effects of shrinkage reducing admixture in shrinkage compensating concrete under non-wet curing conditions. *Cem Concr Comp*, 7 (6) 704-708.

Collepari, M., Olagot, J. J. O., Skarp, U. ve Troli, R. (2002). Influence of Amorphous Colloidal Silica on the Properties of Self-Compacting Concretes. *Proceedings of Challenges in Concrete Construction - Innovations and Developments in Concrete Materials and Construction*, Dundee, Scotland, UK, 9-11 September, 473-483.

Collins, F. ve Sanjayan, J. G. (1999). Effects of ultra-fine materials on workability and strength of concrete containing alkali-activated slag as the binder. *Cem Concr Res*, 29 (3), 459-462.

Cortes, D. D., Kim, H.-K., Palomino, A. M. ve Santamarina, J. C. (2008). Rheological and mechanical properties of mortars prepared with natural and manufactured sands. *Cem Concr Res*, 38 (10), 1142-1147.

Coussot, P. ve Piau, J.M. (1995). A large-scale field concentric cylinder rheometer for the study of the rheology of natural coarse suspensions. *Journal of Rheology*, 39 (1), 105-124.

Craeye, B. ve de Schutter, G. (2006). Experimental Evaluation of Mitigation of Autogenous Shrinkage by Means of a Vertical Dilatometer for Concrete. *International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete*, 20-23 August, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 21-30.

Cyr, M., Legrand, C. ve Mouret, M. (2000). Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives. *Cem Concr Res*, 30 (9), 1477-1483.

Çatal, H. H. (2009). Kişisel iletişim, 30 Mart 2009.

Delucchi, M. ve Cerisola, G. (2005). Influence of thickness on mechanical properties and crack-bridging ability of coatings for concrete. *Progress in Organic Coatings*, 54 (4), 305-309.

Dhir, R. K. ve Jones M. R. (1996). Concrete repair, rehabilitation, and protection. *Proceedings of the international conference held at the University of Dundee*, Scotland, UK, 24-26 June, E. ve F.N. Spon.

Domone, P. (2006). Self-Consolidating Concrete. Simple evaluation of materials and mixture proportions. *Concrete International*, 28 (4), 39-45.

D'Souza, B. (2000). Shrinkage-reducing Admixtures. *Degussa Construction Chemicals*, Australia Pty Ltd, pp. 1-12.

Dyneema fibers. (b.t.). 10.02.2009.

http://www.dsm.com/en_US/html/hpf/home_dyneema.htm

EFNARC (2002), Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. *European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures*, February.

Eguchi, K. ve Teranishi, K. (2005). Prediction equation of drying shrinkage of concrete based on composite model. *Cem Concr Res*, 35 (3), 483-493.

El Barrak, M., Mouret, M. ve Bascoul, A. (2009). Self-compacting concrete paste constituents: Hierarchical classification of their influence on flow properties of the paste. *Cem Concr Comp* 31 (1), 12–21.

Erdogan, S. T., Quiroga, P. N., Fowler, D. W., Saleh, H. A., Livingston, R. A., Garboczi, E. J. ve diğer. (2006). Three-dimensional shape analysis of coarse aggregates: New techniques for and preliminary results on several different coarse aggregates and reference rocks. *Cem Concr Res* 36 (9) 1619–1627.

Esping, O. (2006). Investigation of Autogenous Deformation in Self-Compacting Concrete. *International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete*, 20-23 August, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.

Esping, O. (2008). Effect of limestone filler BET(H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Cem Concr Res*, 38 (7), 938-944.

Felekoğlu, B., Tosun K., Baradan B., Altun A. ve Uyulgan B., (2006). Effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars. *Cem Concr Res*, 36 (9), 1719-1726.

Felekoğlu, B. (2007). Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case). *Resources, Conservation and Recycling*, 51 (4), 770-791.

Felekoğlu, B., Türkel, S. ve Kalyoncu, H. (2009). Optimization of fineness to maximize the strength activity of high-calcium ground fly ash – Portland cement composites. *Constr Build Mat* 23 (5), 2053-2061.

Ferraris, C. F. (1999a). Measurement of the rheological properties of cement paste: A new approach. *Proceedings of RILEM International Symposium on the role of admixtures in high performance concrete*. Monterrey, Mexico, Rilem Publications, Editors: JG Cabrera, RR Rivera Villareal, 333-342.

Ferraris, C. F. (1999b). Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 104 (5), September–October, 461-478.

Ferraris, C. F. ve de-Larrard F. (1998). Testing and Modelling Fresh Concrete Rheology. *Building and Fire Research Laboratories*, Maryland, NISTIR 6094, 71p.

Ferraris, C. F., de Larrard, F. ve Martys, N. (2001). *Fresh Concrete Rheology: Recent Developments*, in Materials Science of Concrete VI, S. Mindess and J. Skalny, Eds., Westerville, OH, 215-241.

Ferraris, C. F., Hackley, V. A., Aviles, A. I. ve Buchanan, C. E. (2002a). Analysis of the ASTM Round-Robin Test on Particle Size Distribution of Portland Cement: Phase I. *National Institute of Standards and Technology*, NISTIR 6883, 24p.

Ferraris, C. F., Hackley, V. A., Aviles, A. I. ve Buchanan, C. E. (2002b). Analysis of the ASTM Round-Robin Test on Particle Size Distribution of Portland Cement: Phase II. *National Institute of Standards and Technology*, NISTIR 6931, 29p.

Ferraris, C. F., Hackley V. A. ve Aviles A. I. (2004). Measurement of Particle Size Distribution in Portland Cement Powder: Analysis of ASTM Round Robin Studies. *Cem Concr Aggr*, 26 (2), 1-11.

Ferraris, C. F., Obla, K. H. ve Hill, R. (2001). The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. *Cem Concr Res*, 31 (2), 245-255.

Filho, R. D. T. ve Sanjuan, M. A. (1999). Effect of low modulus sisal and polypropylene fibre on the free and restrained shrinkage of mortars at early age. *Cem Concr Res*, 29 (10), 1597–1604.

Fischer, G. ve Li, V. C. (2002). Influence of Matrix Ductility on Tension-Stiffening Behavior of Steel Reinforced Engineered Cementitious Composites (ECC). *ACI Structural Journal*, 99 (1), January-February, 104-111.

Fischer, G. ve Li, V. C. (2003). Deformation Behavior of Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Engineered Cementitious Composite (ECC) Flexural Members under Reversed Cyclic Loading Conditions. *ACI Structural Journal*, 100 (1), January-February, 25-35.

Fu, X., Lu, W. ve Chung D. D. L. (1998). Ozone treatment of carbon fiber for reinforcing cement. *Carbon* 36, (9), 1337–1345.

Fuglsang, N. L. (2002). *Quantifying and modelling the rheology of Fresh Concrete as a Bingham-material: 'The behaviour of Bingham materials in a rotation rheometer'*, A text note prepared for students in material mechanics, Dep. of Structural Eng. and Materials. Technical University of Denmark, 14p.

Gallias, J. L., Kara-Ali, R. ve Bigas, J. P. (2000). The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes. *Cem Concr Res*, 30 (10), 1543-1549.

Gilbertson, T. (2001). Atmospheric Plasma. What is it? and What's it good for? *Surface Treating Technology News*, www.enerconind.com/news, 2nd quarter, 2-3.

Hackley, V. A. ve Ferraris, C. F. (2001). Guide to Rheological Nomenclature: Measurements in Ceramic Particulate Systems. *National Institute of Standards and Technology*. Special Publication-946, 31 p.

Haddad, R. H. ve Smadi, M. M. (2004). Role of fibers in controlling unrestrained expansion and arresting cracking in Portland cement concrete undergoing alkali-silica reaction. *Cem Concr Res*, 34 (1), 103-108.

Hammer, T. A. ve Bjontegaard, O. (2006). Testing of Autogenous Deformation (Ad) and Thermal Dilation (Td) of Early Age Mortar and Concrete – Recommended Test Procedure. *International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete*, 20-23 August, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.

Hanehara, S. ve Yamada, K. (2008). Rheology and early age properties of cement systems. *Cem Concr Res*, 38 (2), 175-195.

Hannant, D. J. (2003). Durability of polypropylene fibers in Portland cement-based composites: Eighteen years of data. *Cem Concr Res*, 28 (12), 1809-1817.

He, Z., Li, Z. J., Chen, M. Z. ve Liang, W. Q. (2006). Properties of shrinkage-reducing admixture-modified pastes and mortar. *Materials and Structures*, 39 (4), 445-453.

He, Z., Zhou, X. ve Li, Z. (2004). New Experimental Method for Studying Early-Age Cracking of Cement-Based Materials. *ACI Materials Journal*, 101 (1), 50-56.

Heirmana, G., Vandewalle, L., Van Gemerta, D., Boel, V., Audenaert, K., Schutter, G. ve diğer. (2008). Time-dependent deformations of limestone powder type self-compacting concrete. *Engineering Structures*, 30 (10), 2945-2956.

Holt, E. (2005). Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages. *Cem Concr Res*, 35 (3), 464-472.

Holt, E. ve Leivo, M. (2004). Cracking risks associated with early age shrinkage. *Cem Concr Comp*, 26 (5), 521-530.

Horikoshi, T., Ogawa, A., Saito, T. ve Hoshiro, H. (2005). Properties of Polyvinylalcohol Fiber as Reinforcing Materials for Cementitious Composites. *International RILEM Workshop on HPFRCC in Structural Applications*, Honolulu, HI.

Huang, W.-H. (2001). Improving the properties of cement–fly ash grout using fiber and superplasticizer. *Cem Concr Res*, 31 (7), 1033–1041.

Igarashi, S. ve Watanabe, A. (2006). Experimental Study on Prevention of Autogenous Deformation by Internal Curing Using Super-Absorbent Polymer Particles. *International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete*. 20-23 August, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 77-86.

Inaguma, H., Seki, M., Suda, K. ve Rokugo, K. (2005). Experimental Study on Crack-Bridging Ability of ECC for Repair under Train Loading. *International RILEM Workshop on HPFRCC in Structural Applications*. Honolulu, HI.

Jarny, N., Roussel, S., Rodts, F., Bertrand, R., Le Roy ve P., Coussot. Rheological behavior of cement pastes from MRI velocimetry. *Cem Concr Res*, 35 (10) 1873-1881.

Jumaat, M. Z., Kabir, M. H. ve Obaydullah M. (2006). A Review of the Repair of Reinforced Concrete Beams. *Journal of Applied Science Research*, 2 (6), 317-326.

Kamal, A., Kunieda, M., Ueda, N. ve Nakamura, H. (2008). Evaluation of Crack Opening Performance of a Repair Material with Strain Hardening Behavior. *Cem Concr Comp*, 30 (10), 863-871.

Kamen A., Denarie, E., Sadouki, H. ve Bruhwiler, E. (baskıda). Evaluation of UHPFRC activation energy using empirical models. *Materials and Structures*. DOI 10.1617/s11527-008-9400-z

Kanda, T. ve Li, V. C. (1998). Multiple cracking sequence and saturation in fiber reinforced cementitious composites. *Concrete Research and Technology*, 9 (2), 19-32.

Kanda, T. ve Li, V. C. (1999). New Micromechanics Design Theory For Pseudo strain Hardening Cementitious Composite, *Journal of Engineering Mechanics*, 125 (4), 373-381.

Kanda T. ve Li, V. C. (2006). Practical Design Criteria for Saturated Pseudo Strain Hardening Behavior in ECC. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4 (1), 59-72.

Kaplan, S. L. (2003). Cold Gas Plasma and Silanes. *Fourth International Symposium on Silanes and Other Coupling Agents*, June 11-13, Orlando, Florida.

Kaplan, S. L. (2004). Plasma processes for wide fabric, film and non-wovens. *Surface ve Coatings Technology*, 186 (1-2), 214-17.

Karacan, İ. (2006). A comparative study of structure-property relationships in highly oriented thermoplastic and thermotropic polyesters with different chemical structures. *Journal of Applied Polymer Science*, 100 (1), 142-160.

Katz, A., Li, V. C. ve Kazmer, A. (1995). Bond properties of carbon fibers in cementitious matrix. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 7 (2), 125-128.

Kaufmann, J. P., Winnefeld, F., Hesselbarth, D. ve Trindler, W. (2006). Evaluation of the consistency of fiber reinforced cementitious composites. *Materials and Structures*, 39 (6), 645–654.

Kayir, H., Qi, C. ve Weiss, J. (2002). A fundamental look at settlement in fresh systems: Role of mixing time and high range water reducers. *ACBM Semi-annual meeting*, Ann Arbor MI.

Keith, F. R., Bentley, C. L., Walker, W. W. ve Holland, J. A. (2006). Shrinkage-Compensating Concrete Pavements Perform Well. *Concrete International*, 28 (1), 47-51.

Keoleian, G. A., Kendall, A. M., Lepech, M. D. ve Li, V. C. (2006). Guiding the design and application of new materials for enhancing sustainability performance: Framework and infrastructure application. *Materials Research Society Symposium*, V.895, 12p.

Keoleian, G. A., Kendall, A., Dettling, J. E., Smith, V. M., Chandler, R. F., Lepech, M.D. ve diğer. (2005). Life Cycle Modeling of Concrete Bridge Design: Comparison of Engineered Cementitious Composite Link Slabs and Conventional Steel Expansion Joints. *Journal of Infrastructure Systems*, 11 (1), 51-60.

Kim, D. J., Naaman, A. E. ve El-Tawil, S. (2008). Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites. *Cem Concr Comp*, 30 (10), 917-928.

Kim, Y. Y., Kong, H.-J. ve Li, V. C. (2003). Design of Engineered Cementitious Composite Suitable for Wet-Mixture Shotcreting. *ACI Materials Journal*, 100 (6), 511-518.

Koehler, E. P. ve Fowler, D. W. (2004). Development of a Portable Rheometer for Fresh Portland Cement Concrete. *Aggregates Foundation for Technology, Research and Education (AFTRE)*, Project No. ICAR-105, August, 306 p.

Koenders, E. A. B., Schlangen, E. ve Leegwater, G. (2006). A Mini-TSTM For Measuring Paste Deformations at Early Ages. *International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete*, 20-23 August, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.

Kong, H.-J., Bike, S. G. ve Li, V. C. (2003). Development of a self-consolidating engineered cementitious composite employing electrosteric dispersion/stabilization. *Cem Concr Comp*, 25 (3), 301–309.

Kovler, K. ve Zhutovsky, S. (2006). Overview and future trends of shrinkage research. *Materials and Structures*, 39 (9), 827–847.

Kuder, K. G., Özyurt, N., Mu, E. B. ve Shah., S. P. (2007). Rheology of fiber-reinforced cementitious materials. *Cem Concr Res* 37 (2), 191–199.

Kunieda M. ve Rokugo K. (2006). Recent Progress on HPFRCC in Japan, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4 (1), 19-33.

Kutlu, B. ve Cireli, A. (2004). Plasma technology in textile processing. *3rd Indo-Czech Textile Research Conference*, June 14-16, Liberec, Czech Republic, 10p.

Larner, M. ve Kaplan, S. L. (2004). The Challenge of Plasma Processing – Its Diversity. *ASM Materials and Processes for Medical Devices Conference*, August 25-27, St. Paul, Minnesota, 6p.

Larson, K. H. (2006). *Evaluating the Time-Dependent Deformations and Bond Characteristics of a Self-Consolidating Concrete Mix and the Implication for Pretensioned Bridge Applications*. PhD Thesis, Dep. of Civil Eng., College of Eng., Kansas State University, Manhattan, Kansas, 229p.

Lauger, J., Muller, M. ve Tyrach, J. (1999). A New Ball Measuring System for Large Particle Suspensions. *Physicamesstechnik GMBH, Applied Rheology*, July/August, 145-147.

Lee, S. C., Quek, S. T. ve Maalej, M. (2006). 3D FE Modeling of Hybrid-Fiber ECC Panels Subjected to Projectile Impact. *International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications*. RILEM Publications SARL, 489-497.

Leemann, A. ve Winnefeld, F. (2007). The effect of viscosity modifying agents on mortar and concrete. *Cem Concr Comp*, 29 (5), 341-349.

Lepech, M. D., Keoleian, G. A., Qian, S. ve Li, V. C. (2008). Design of green engineered cementitious composites for pavement overlay applications. *Life-Cycle Civil Engineering* – Biondini ve Frangopol (eds), Taylor ve Francis Group, 837-842.

Lepech, M. D., Li, V. C., Robertson, R. E. ve Keoleian, G. A. (2008). Design of Green Engineered Cementitious Composites for Improved Sustainability. *ACI Materials Journal*, 105 (6), 567-575.

Li, R., Ye, L. ve Mai, Y. W. (1997). Application of plasma technologies in fibre-reinforced polymer composites: A review of recent developments. *Composites Part A*, 28 (1), 73-86.

Li, V. C. (2000). J-Integral Applications to Characterization and Tailoring of Cementitious Materials. *Multiscale Deformation and Fracture in Materials and Structures*, Kluwer Ac. Pubs., Netherlands, 385-406.

Li, V. C. (2002). Advances in ECC Research. *Concrete: Materials Science to Application*. *ACI Special Publication*, SP 206-23, 373-400.

Li, V. C. (2003a). Durable Overlay Systems with Engineered Cementitious Composites (ECC). *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments*, 9 (2), 1–20.

Li, V. C. (2003b). On Engineered Cementitious Composites (ECC). A Review of the Material and Its Applications. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1 (3), 215-230.

Li, V. C. (2004). High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites as Durable Material for Concrete Structure Repair. *International Journal for Restoration*, 10 (2), 163–180.

Li, V. C., Kong, H. J. ve Chan, Y. W. (1998). Development of Self-Compacting Engineered Cementitious Composites. *Proceedings of International Workshop on Self-Compacting Concrete*, Kochi, Japan, 46-59.

Li, V. C. ve Stang, H. (1997). Interface property characterization and strengthening mechanisms in fiber reinforced cement based composites. *Advn Cem Bas Mat*, 6 (1), 1-20.

Li, V. C. ve Wu, H.-C. (1998). *Control of Interface Properties between Fiber/Cement Using Plasma Treatment*. World Intellectual Property Organization, Patent no: 48109-2125.

Li, V. C., Horikoshi, T., Ogawa, A., Torigoe, S. ve Saito, T. (2004). Micromechanics-Based Durability Study of Polyvinyl Alcohol-Engineered Cementitious Composite. *ACI Materials Journal*, 101 (3), 242-248.

Li, V. C. ve Kanda, T. (1998). Engineered Cementitious Composites for Structural Applications. *Innovations Forum in ASCE J. Materials in Civil Engineering*, 10 (2), 66-69.

Li, V. C. ve Lepech, M. (2006). General Design Assumptions for ECC. *International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications*. RILEM Publications SARL, 269-277.

- Li, V. C. ve Maalej, M. (1996). Toughening in cement based composites. Part I: Cement, Mortar, and Concrete. *Cem Concr Comp* 18 (4), 223-237.
- Li, V. C., Mishra, D. K. ve Wu, H.-C. (1995). Matrix design for pseudo-strain-hardening fibre reinforced cementitious composites. *Materials and Structures*, 28 (10), 586-595.
- Li, V. C. ve Obla, K. H. (1994). Effect of fiber length variation on tensile properties of carbon-fiber cement composites. *Composites Engineering*, 4 (9), 947-964.
- Li, V. C. ve Wang, S. (2006). Microstructure variability and macroscopic composite properties of high performance fiber reinforced cementitious composites. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 21 (3), 201–206.
- Li, V. C., Wu, C., Wang, S., Ogawa, A. ve Saito, T. (2002). Interface Tailoring for Strain-Hardening Polyvinyl Alcohol- Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC). *ACI Materials Journal*, 99 (5), 463-472.
- Li, Z., Lara, M. A. P., ve Bolander, J. E. (2006). Restraining effects of fibers during non-uniform drying of cement composites. *Cem Concr Res* 36 (9), 1643–1652.
- Liang, S., Yang, H., Wang, K., Zhang, Q., Du, R. ve Fu, Q. (2008). Unique crystal morphology and tensile properties of injection-molded bar of LLDPE by adding HDPE with different molecular weights. *Acta Materialia*, 56 (1), 50–59.
- Lin, Z., Kanda, T. ve Li, V. C. (1999). On interface property characterizat on and performance of fiber-reinforced cementitious composites. *Concrete Science and Engineering*, 1 (9), 173-174.
- Lin, Z. ve Kishi, T. (2006). Volume Changes and Restrained Stress of Lightweight Concrete and Expansive Concrete. *International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete*, 20-23 August, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 41-50.

Litle, W. A. ve Paparoni, M. (1966). Size Effect in Small-Scale Models of Reinforced Concrete Beams. *ACI Special Publication*, 63 (11), JL63-54, 1191-1204.

Lombois-Burger, H., Colombet, P., Halary, J. L. ve Van Damme, H. (2006). Kneading and extrusion of dense polymer–cement pastes. *Cem Concr Res* 36 (11), 2086-97.

Loos, J. ve Schimanski, T. (2005). Effect of Postdrawing Temperature on Structure, Morphology, and Mechanical Properties of Melt-Spun Isotactic Polypropylene Tapes. *Macromolecules*, 38 (26), 10678-10685.

Loser, R. ve Leemann, A. (2009). Shrinkage and restrained shrinkage cracking of self-compacting concrete compared to conventionally vibrated concrete. *Materials and Structures*, 42 (1), 71–82.

Loukili, A., Chopin, D., Khelidj, A. ve Le Touzo, J. Y. (2000). A new approach to determine autogenous shrinkage of mortar at an early age considering temperature history. *Cem Concr Res*, 30 (6), 915-922.

Löfgren, I. ve Esping O. (2006). Early Age Cracking of Self-Compacting Concrete. *International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete*. 20-23 August, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 251-260.

Lu, G., Wang, K. ve Rudolphi, T.J. (2008). Modeling rheological behavior of highly flowable mortar using concepts of particle and fluid mechanics. *Cem Concr Comp*, 30 (1), 1–12.

Lura, P., Durand, F. ve Jensen, O. M. (2006). Autogenous strain of cement pastes with superabsorbent polymers. *International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete*, 20-23 August, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 57-65.

Lura, P. ve Jensen, O. M. (2007). Measuring techniques for autogenous strain of cement paste. *Materials and Structures*, 40 (4), 431–440.

Lura P, Mazzotta G. B., Rajabipour F. ve Weiss J. (2006). Evaporation, settlement, temperature evolution, and development of plastic shrinkage cracks in mortars with shrinkage-reducing admixtures. *Proceedings of the international RILEM-JCI seminar on concrete durability and service life planning*, Ein-Bokek, Israel, 203-13.

Ma, X. ve Hooton, R. D. (2006). Numerical Simulation and Assessment of Self-Induced Tensile Stress in Steel Ring Restrained Concrete Specimens. *International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete*. 20-23 August, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 157-164.

Mahaut, F., Mokéddem, S., Chateau, X., Roussel, N. ve Ovarlez, G. (2008). Effect of coarse particle volume fraction on the yield stress and thixotropy of cementitious materials. *Cem Concr Res*, 38 (11), 1276-1285.

Manolis, G. D., Gareis, P. J., Tsonos, A. D. ve Neal, J. A. (1997). Dynamic Properties of Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete Slabs. *Cem Concr Comp*, 19 (4), 341-349.

Matute, B. ve Arturo, A. (2007). *Vibro-Pressed Micro-Concrete in Synthetic Formwork in Panels-Sheets-Moulded Sections*. World Intellectual Property Organization, Patent no: WO/2007/137592.

Mehta, P. K. ve Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete – microstructure and properties*. Third edition. USA: Mcgraw-Hill.

Mesbahu, H. A. ve Buyle-Bodin, F. (1999). Efficiency of polypropylene and metallic fibres on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars. *Constr Build Mat*, 13 (8), 439-447.

Metzner, A. B. ve Otto, R. E. (1957). Agitation of non-Newtonian fluids. *AIChE Journal*, 3, pp.3-10.

Mihashi, H., Kikuchi, T., Akita, H. ve Fantili, A. (2006). Testing Method and Modelling of HPFRCC. *International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications*. Eds: G. Fischer and V. C. Li, RILEM Publications SARL, 7-16.

Mishra, D. (1995). *Design of Pseudo Strain-Hardening Cementitious Composites for a Ductile Plastic Hinge*, PhD Thesis, Univ. of Michigan, Ann Arbor, MI, 1995.

Mobasher, B., Peled, A. ve Pahilajani, J. (2006). Distributed cracking and stiffness degradation in fabric-cement composites, *Materials and Structures*, 39 (3), 317–331.

Mokarem, D. W., Weyers, R. E. ve Lane, D. S. (2005). Development of a shrinkage performance specifications and prediction model analysis for supplemental cementitious material concrete mixtures. *Cem Concr Res*, 35 (5), 918-925.

Mokarem, D. W., Lane, D. S., Ozyildirim, H. Ç. ve Sprinkel, M. M. (2008). Measurement of Early Age Shrinkage of Virginia Concrete Mixtures. *Virginia Department of Transportation*. Report No. VTRC 08-R9, 21p.

Mounanga, P., Baroghel-Bouny, V., Loukili, A. ve Khelidj, A. (2006). Autogenous deformations of cement pastes: Part I. Temperature effects at early age and micro–macro correlations. *Cem Concr Res* 36 (1), 110– 122.

Mouret, M. ve Cyr, M. (2003). A discussion of the paper ‘‘The effect of measuring procedure on the apparent rheological properties of self-compacting concrete’’ by Mette R. Geiker, Mari Brandl, Lars N. Thrane, Dirch H. Bager and Olafur Wallevik. *Cem Concr Res* 33 (11) 1901-03.

Mönnig, S. ve Reinhardt H.-W. (2006). Results of a Comparative Study of the Shrinkage Behaviour of Concrete and Mortar Mixtures with Different Internal Water Sources. *International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete*. 20-23 August, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 67-75.

Müller, M., Tyrach, J. ve Brunn, P. O. (1999). Rheological characterization of machine applied plasters. *ZKG International*, 52 (5), 252-258.

Nassif, H., Suksawang, N. ve Maqbool M. (2003). Effect of Curing Methods on Early-age and Drying Shrinkage of High Performance Concrete. *Journal of the Transportation Research Board*. No.1834, TRB National Research Council, Washington, D.C., p. 48.

Nehdi, M., Mindess, S. ve Aitcin, P.-C. (1998). Rheology of high-performance concrete: Effect of ultrafine particles. *Cem Concr Res*, 28 (5), 687-97.

Nehdi, M. ve Rahman, M.-A. (2004). Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction. *Cem Concr Res*, 34 (11), 1993–2007.

Newlands, M. D., Paine, K. A., Vemuri, N. A. ve Dhir, R. K. (2008). A linear test method for determining early-age shrinkage of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 60 (10), 747–757.

Nielsen, L. F. (2002). *The behaviour of Bingham materials in a rotation rheometer*. A text note prepared for students in material mechanics. Dep. of Structural Eng. and Materials. Technical University of Denmark, 14 pp.

Nischer P. (1999). The effect of different additions on flowability of SCC. *Proceedings of the First International RILEM Symposium*, A.Skarendahl and Ö. Petersson (Eds.), 561-568.

Noguchi T., Oh S. G. ve Tomosawa F. (1999). Rheological Approach to Passing Ability between Reinforcing Bars of Self-Compacting Concrete. *Proceedings of the First International RILEM Symposium*. A.Skarendahl and Ö. Petersson (Eds.), 59-70.

Nounua, G. ve Chaudhary, Z.-U.-H. (1999). Reinforced concrete repairs in beams. *Constr Build Mat*, 13 (4), 195-212.

Ogawa, A., Hitomi, Y. ve Hoshiro, H. (2005). PVA-Fiber Reinforced High Performance Cement Board. *International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications*. RILEM Publications SARL.

Orhan, M., Özer, M. ve Işık, N. S. (2004) Investigation of laser diffraction and sedimentation methods which are used for the determination of grain size distribution of fine grained soils. *G.U. Journal of Science*, 17 (2), 105-113.

Oros, M. (2008). *Sculpture art*.

<http://ace-mrl.engin.umich.edu/NewFiles/artnfun.html>

Ostergaard, L. ve Olesen, J. F. (2006). Method for Determination of Tensile Properties of ECC I: Formulation and parameter variations. *International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications*. RILEM Publications SARL.

Ovarlez, G. ve Roussel, N. (2006). A physical model for the prediction of lateral stress exerted by self-compacting concrete on formwork. *Materials and Structures*, 39 (2), 269-79.

Özer, B., Parlak, N., Sağlam, A. R. ve Özkul, M. H. (2007). Farklı Kimyasal Yapıdaki Kür Malzemelerinin Su Kaybını Önleme ve Yapışma Davranışlarının İncelenmesi. *7. Ulusal Beton Kongresi*, 28-30 Kasım, 43-54.

Paiva, H., Silva, L. M., Labrincha, J. A. ve Ferreira, V. M. (2006). Effects of a water-retaining agent on the rheological behaviour of a single-coat render mortar. *Cem Concr Res*, 36 (7), 1257–1262.

Pane, I. ve Hansen, W. (2008). Investigation on key properties controlling early-age stress development of blended cement concrete. *Cem Concr Res*, 38 (11), 1325-1335.

Papo, A. ve Piani, L. (2004). Flow Behavior of Fresh Portland Cement Pastes. *Particulate Science and Technology*, 22 (2), 201-212.

Park, S.-B. ve Lee, B. C. (2004). Studies on expansion properties in mortar containing waste glass and fibers. *Cem Concr Res*, 34 (7), 1145–1152.

Pease, B. J. (2005). *The role of shrinkage reducing admixtures on shrinkage, stress development, and cracking*. MSc Thesis, Purdue University, May, 217p.

Phan, T. H., Chaouche, M. ve Moranville, M. (2006). Influence of organic admixtures on the rheological behaviour of cement pastes. *Cem Concr Res*, 36 (10), 1807-1813.

Power, D. ve Zamora, M. (2003). Drilling Fluid Yield Stress: Measurement Techniques for Improved Understanding of Critical Drilling Fluid Parameters. *National Technology Conference. American Association of Drilling Engineers*, Houston, Texas, AADE-03-NTCE-35, 1-9.

Qi, C., Pease, B., Hossain, A., Puri, S., Weiss, J., Olek, J. ve diğer. (2002). Blended fiber reinforcement for improving the cracking resistance of concrete pavements, slabs, bridge decks, and industrial floors. *ACBM Semi-annual meeting*, October, Ann Arbor MI.

Qian, S. ve Li, V. C. (2005). Elevating Material Ductility to Structural Performance of Steel Anchoring to ECC. *International Workshop on HPFRCC in Structural Applications*. Honolulu, HI, USA, 529-537.

Quiroga, P. N. ve Fowler, D. W. (2004). The Effects of Aggregates Characteristics on the Performance of Portland Cement Concrete. *Aggregates Foundation for Technology, Research and Education (AFTRE)*, Project No. ICAR 104-1F, August, 382 p.

Ramyar, K. (2000). *Dimensional Stability of Concrete. Lecture Notes*. Dokuz Eylül University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, unpublished.

Rawle, A. (2007). An introduction to the links between rheology and particle size. Malvern Instruments Ltd. Online Seminar.
<http://www.malvern.com/common/webcasts/webcasts.htm>.

Rheoplus Software (2007). *Instruction Manual*, Anton Paar, Germany GmbH, Ostfildern.

Rokugo, K., Kunieda, M. ve Miyazato, S. (2006). Structural Applications of HPFRCC in Japan. *Proceedings of Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties*, M.S. Konsta-Gdoutos, (Eds.), Springer, 17-23.

Roussel, N. (2006). A theoretical frame to study stability of fresh concrete. *Materials and Structures*, 39 (1), 81-91.

Roussel, N. (2007). The LCPC BOX: a cheap and simple technique for yield stress measurements of SCC. *Materials and Structures*, 40 (9), 889–896.

Roussel, N. ve Coussot, P. (2005). Fifty-cent rheometer for yield stress measurements: From slump to spreading flow. *J. Rheol.* 49 (3), 705-718.

Roussel, N. ve Cussigh, F. (2008). Distinct-layer casting of SCC: The mechanical consequences of thixotropy. *Cem Concr Res*, 38 (5), 624-632.

Roussel, N. ve Lanos, C. (2003). Plastic Fluid Flow Parameters Identification Using a Simple Squeezing Test. *Applied Rheology*, 13 (3), 132-141.

Roussel, N., Le Roy R. ve Coussot, P. (2004). Thixotropy modelling at local and macroscopic scales. *J. Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 117 (2-3), 85-95.

Roussel, N., Geiker, M. R., Dufour, F., Thrane, L. N. ve Szabo, P. (2007). Computational modeling of concrete flow: General overview. *Cem Concr Res*, 37 (9), 1298-1307.

Ruiz, G. (2001). Propagation of a cohesive crack crossing a reinforcement layer. *International Journal of Fracture*, 111 (3), 265-282.

Saak, A. W. (2000). *Characterization and modelling of the rheology of cement paste: With applications toward self-flowing materials*. PhD Thesis, Northwestern University, Evanston, Illinois, June, 256p.

Saak, A. W., Jennings H. M. ve Shah S. P. (1999). Characterization of the rheological properties of cement paste for use in self-compacting concrete. *Proceedings of the First International RILEM Symposium*. A.Skarendahl and Ö. Petersson (Eds), 83-94.

Saak, A. W., Jennings, H. M. ve Shah S. P. (2001) The influence of wall slip on yield stress and viscoelastic measurements of cement paste. *Cem Concr Res*, 31 (2), 205-212.

Sağlam, A. R. ve Özkul, M. H. (2006). Kendiliğinden yerleşen betonların reolojik özelliklerine bileşim parametrelerinin etkisi. *İTÜ Dergisi-D (Mühendislik)* 5 (1b), 239-250.

Sanjuan, M. A. ve Moragues, A. (1997). Polypropylene fiber reinforced mortar mixes: Optimization to Control Plastic Shrinkage. *Composites Science and Technology*, 57 (6), 655-660.

Santos, A. G., Rincon, J. M., Romero, M. ve Talero, R. (2005). Characterization of a polypropylene fibered cement composite using ESEM, FESEM and mechanical testing. *Constr Build Mat*, 19 (5), 396–403.

Schatzmann, M. (2005). *Rheometry for large particle fluids and debris flows*. PhD Thesis. Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 16093, 192pp. <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/view/eth:27979>

Schatzmann, M., Fischer, P. ve Bezzola, G.R. (2003). Rheological Behavior of Fine and Large Particle Suspensions. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 129 (10), 796-803.

Schiessl, P. ve Rucker, P. (2005). New Results on Early-Age Cracking Risk of Special Concretes. *Concrete Cracking Workshop*, PPT presentation, ACBM, August.

Schwartzentruber, A., Philippe, M. ve Marchese, G. (2004). Effect of PVA, glass and metallic fibers, and of an expansive admixture on the cracking tendency of ultra high strength mortar. *Cem Concr Comp*, 26 (5), 573–580.

Schwartzentruber L. D. A., Le Roy R. ve Cordin J. (2006). Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a Self Compacting Concrete (SCC), *Cem Concr Res*, 36 (7), 1203-13.

Sedran, T. (2000). Rheology. Final Report of Task 3, *Brite EuRam Project*. BE96-3801, 20p.

Sett, K. ve Vipulanandan, C. (2004). Properties of Polyester Polymer Concrete with Glass and Carbon Fibers. *ACI Materials Journal*, 101 (1), January-February, 30-41.

Shah S. P., Weiss, W. J. ve Yang W. (1997). Shrinkage cracking in high performance concrete. *Proceedings of the PCI/FHWA, International Symposium on High Performance Concrete*. New Orleans, Louisiana, October 20-22, 148-158.

Shiotani, T., Bisschop, J. ve Van Mier, J. G. M. (2003). Temporal and spatial development of drying shrinkage cracking in cement-based materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 70 (12), 1509-1525.

Shuster, L. A. (2005). Flexible Concrete Tested on Bridge Deck. *Civil Engineering News, Materials*, July, 30-31.

Singh, S., Shukla, A. ve Brown, R. (2004). Pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix. *Cem Concr Res*, 34 (10), 1919–1925.

Sonebi, M. (2006). Rheological properties of grouts with viscosity modifying agents as diutan gum and welan gum incorporating pulverised fly ash. *Cem Concr Res*, 36 (9), 1609-1618.

Song, P. S., Hwang, S. ve Sheu, B. C. (2005). Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes. *Cem Concr Res*, 35 (8), 1546– 1550.

Stang, H. ve Li, V. C. (1999). Extrusion of ECC-Material. *Proceedings of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*. H. Reinhardt and A. Naaman (Eds.), Chapman ve Hull, 1999, pp. 203-212.

Stratmann, M. (2003). *Novel Zinc Alloy Coatings: Tailored Semi-Conducting Oxides for Improved Corrosion Resistance and Adhesion*. Dep. of Interface Chemistry and Surface Technology Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Düsseldorf/Germany, 49 p.

Stroeve P. ve Hu, J (2006). Review paper – stereology: Historical perspective and applicability to concrete technology. *Materials and Structures* 39 (1), 127-135.

Şahmaran, M. ve Li, V. C. (2008). Durability of Mechanically Loaded Engineered Cementitious Composites under Highly Alkaline Environments. *Cem Concr Comp*, 30 (2), 72-81.

Şahmaran, M., Özkan, N., Keskin, S. B., Uzal, B., Yaman, İ. Ö. ve Erdem, T. K. (2008). Evaluation of natural zeolite as a viscosity-modifying agent for cement-based grouts. *Cem Concr Res* 38 (7), 930-937.

Tendero, C., Tixier, C., Tristant, P., Desmaison, J. ve Leprince, P. (2006). Atmospheric pressure plasmas: A review. *Spectrochimica Acta Part B* 61 (1), 2-30.

Topal, A. (2008). *Agregaların geometrik özelliklerinin belirlenmesine yönelik yeni görüntü analiz yöntemleri geliştirilmesi*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Topçu, İ. B. ve Canbaz, M. (2007). Effect of different fibers on the mechanical properties of concrete containing fly ash. *Constr Build Mat*, 21 (7), 1486-1491.

Tosun, K., Yazıcı, H., Yiğiter, H. ve Baradan, B. (2003). Uçucu kül içeren çimento harçlarının sülfat dayanıklılığının incelenmesi. 5. Ulusal Beton kongresi, 1-3 Ekim, İstanbul, 17-26.

Toumi, A., Bascoul, A. ve Turatsinze, A. (1998). Crack propagation in concrete subjected to flexuralcyclic loading. *Materials and Structures*, 31 (7), 451-458.

Toutanji, H. A. (1999). Properties of polypropylene fiber reinforced silica fume expansive-cement concrete. *Constr Build Mat*, 13 (4), 171-177.

TS 500 (2000). *Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 196-1 (2006). *Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 196-3 (2002). *Çimento deney metotları - Bölüm 3: Priz süresi ve genleşme tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 934-2 (2002). *Kimyasal katkıları - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton katkıları – Tarifler, özellikler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 450 (1998). *Uçucu kül – Betonda kullanılan – Tarifler, Özellikler ve Kalite Kontrolü*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS 2824 EN 1338 (2005). *Zemin döşemesi için beton kaplama blokları - Gerekli şartlar ve deney metotları*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Türker P., Erdoğan B., Katnaş F. ve Yeğınobalı A., (2004). *Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri*, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Yayınları, Ankara.

Tyrach J. (2001). *Rheological characterization of cementitious building materials*. PhD Thesis, University of Erlangen-Nürnberg, Germany.

Vikan, H., Justnes, H., Winnefeld, F. ve Figi, R. (2007). Correlating cement characteristics with rheology of paste. *Cem Concr Res*, 37 (11), 1502-1511.

Wallevik, J. E. (2003). *Rheology of particle suspensions: Fresh concrete, mortar and cement paste with various types of lignosulfonates*. PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Department of Structural Engineering, 397 p.

Wallevik, J. E. (2005). Thixotropic investigation on cement paste: Experimental and numerical approach. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 132 (1-3) 86–99.

Wallevik, J. E. (2006). Relationship between the Bingham parameters and slump. *Cem Concr Res*, 36 (7), 1214–1221.

Wang, S. ve Li, V. C. (2004). Tailoring of pre-existing flaws in ECC matrix for saturated strain hardening. *Proceedings of Fracture Mechanics of Concrete Structures (FRAMCOS)-5*, Colorado, USA, April, (Eds: Li ve diğer.) 1005-1012.

Westerholm, M., Lagerblad, B. ve Forssberg, E. (2007). Rheological properties of micromortars containing fines from manufactured aggregates. *Materials and Structures*, 40 (6), 615–625.

Westerholm, M., Lagerblad, B., Silfwerbrand, J. ve Forssberg, E. (2008). Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. *Cem Concr Comp* 30 (4), 274–282.

Williams, D. A., Saak, A. W. ve Jennings, H. M. (1999). The influence of mixing on the rheology of fresh cement paste. *Cem Concr Res*, 29 (9), 1491–1496.

Windhab (2001). Verfahrenstechnik IV. Vorlesungsskriptum für Studierende der Departemente Chemie und Agrarwissenschaften. Institut für Lebensmittelwissenschaft der ETH Zürich. 124p.

Wong, H. S., Head, M. K. ve Buenfeld, N. R. (2006). Pore segmentation of cement based materials from backscattered electron images. *Cem Concr Res*, 36 (6), 1083-90.

Wongtanakitcharoen, T. ve Naaman, A. E. (2007). Unrestrained early age shrinkage of concrete with polypropylene, PVA, and carbon fibers. *Materials and Structures*, 40 (3), 289–300.

Wu, H.-C. ve Li, V. C. (1999). Fiber/cement interface tailoring with plasma treatment. *Cem Concr Comp*, 21 (3), 205-212.

Yahia, A., Tanimura, M. ve Shimoyama, Y. (2002). Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio. *Cem Concr Res*, 35 (3), 532– 539.

Yammine, J., Chaouche, M., Guerinnet, M., Moranville, M. ve Roussel, N. (2008). From ordinary rheology concrete to self compacting concrete: A transition between frictional and hydrodynamic interactions. *Cem Concr Res* 38 (7), 890–896.

Yelgin, A. N. ve Yalman, H. Y. (2007). Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Hazır Betonarme Plaklı Kompozit Kirişlerin Negatif Moment Bölgesinde Yapısal Davranışı. *Türkiye Prefabrik Birliği 12. Sempozyumu "Prefabrikasyonda Yenilikler Ve Eğitim"*, 13 Kasım, İstanbul, 12s.

Yu, R. C. ve Ruiz, G. (2006). Explicit finite element modeling of static crack propagation in reinforced concrete. *International Journal of Fracture*, 141 (3-4), 357–372.

Yunsheng, Z., Wei, S., Zongjin, L., Xiangming, Z. ve Chungkong, E.C. (2008). Impact properties of geopolymer based extrudates incorporated with fly ash and PVA short fiber. *Constr Build Mat*, 22 (3), 373-383.

Yücel, K. T. (2006). Effect of Fly Ashes on the Rheological Properties of Fresh Cement Mortars. *International Journal of Thermophysics*, 27 (3), 906-921.

Yükselen, Y. ve Kaya, A. (2006). Farklı mineralojideki killerin özgül yüzey alanının belirlenmesi. *Kibited I* (2), 107 – 114.

Zhang, J., Leung, C. K. Y. ve Cheung, Y. N. (2006). Flexural performance of layered ECC-concrete composite beam. *Composites Science and Technology*, 66 (11-12), 1501-1512.

Zhang, J. ve Li, V. C. (2002). Monotonic and fatigue performance in bending of fiber-reinforced engineered cementitious composite in overlay system. *Cem Concr Res*, 32 (3), 415–423.

Zhang, J., Li, V. C., Nowak, A. S. ve Wang, S. (2002). Introducing Ductile Strip for Durability Enhancement of Concrete Slabs. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14 (3), 253-261.

Zhang, M. H., Tam, C. T. ve Leow, M. P. (2003). Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete. *Cem Concr Res*, 33 (10), 1687-1694

Zhou, J., Li, M., Ye, G., Schlangen, E., van Breugel, K. ve Li, V. C. (2008). Modelling the performance of ECC repair systems under differential volume changes. *Proc. 2nd Int'l Conf. on Concrete Repair (ICCRRR), Rehabilitation and Retrofitting*, Cape Town, S. Africa, 1005-1009.

Zhutovsky, S., Kovler, K. ve Bentur, A. (2004). Influence of cement paste matrix properties on the autogenous curing of high-performance concrete. *Cem Concr Comp*, 26 (5), 499–507.

EKLER

EK – A : Kısaltma ve Simge Listesi

EK – B : Statik EKG değerlerinin belirlendiği, $0,1 \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızındaki kayma gerilmesi – zaman grafikleri (Bölüm 3).

EK – C : Başlangıç viskozitesi değerlerinin belirlendiği, $0,1 \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızındaki viskozite – zaman grafikleri (Bölüm 3).

EK – D : Argon ve oksijen plazması uygulanmış PP lifli kompozitlerin yük-sehim grafikleri (Bölüm 4).

EK – E : Argon ve oksijen plazması uygulanmış %1 YYPE lifli kompozitlerin yük-sehim grafikleri (Bölüm 4).

EK – F : Argon ve oksijen plazması uygulanması sonrasında yağlanmış %2 PVA lifli kompozitlerin yük-sehim grafikleri (Bölüm 4).

KISALTMA VE SİMGE LİSTESİ

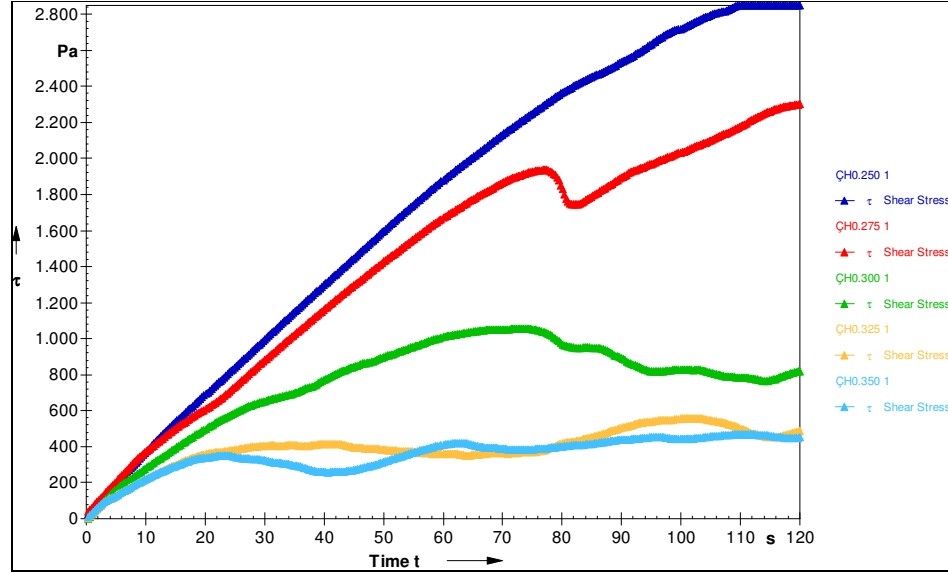
MB: Mikro Beton	(yield stress)
ECC: Engineered Cementitious Composites	μ_c : Casson viskozite parametresi
S/Ç: Ağırlıkça su/çimento oranı	T: Dönme momenti
ACI: Amerikan Beton Enstitüsü	Ω : Dönüş hızı
ASR: Alkali Silika Reaksiyonu	R_i : Çift silindirli reometrede iç silindirin çapı
KYB: Kendiliğinden Yerleşen Beton	R_o : Çift silindirli reometrede dış silindirin çapı
S/B: Ağırlıkça su/bağlayıcı oranı	L: Çift silindirli reometrede iç silindirin uzunluğu
CCS: İç içe iki silindirli reometre sistemi (Concentric Cylinder System)	R: Koni-plaka reometrede taban çapı
CPS: Koni-plaka reometre sistemi (Cone-plate)	α : Koni-plaka reometrede koninin tabanla yaptığı açı
PPS: İki paralel plakalı reometre sistemi (Paralel-plate)	g: Bıçak plakalı (vane) reometrede dönme momenti sabiti
PP: Polipropilen	h: Bıçak plakalı (vane) reometrede plastik viskozite sabiti
YYPE: Yüksek yoğunluklu polietilen	Re: Reynolds sayısı
PVA: Polivinil alkol	P: Bilyeli reometrede bilye enerjisi
LDS: Lazer Difraksiyon Dağılımı	Ne: Newton sayısı
ÇH: Çimento hamuru	D: Bilyenin çapı
BMS: Bilyeli ölçüm sistemi (Ball measuring system)	ρ : Bilyenin içinde sürüklendiği malzemenin yoğunluğu
EKG: Eşik kayma gerilmesi	C: Bilyeli sistemin karakteristik katsayısı
PV: Plastik viskozite	K_T : Laminer akış halinde eşik kayma gerilmesi katsayısı
T: Tikotropik davranış	k_1, k_2, k_3 : Türbülanslı akış katsayıları
R: Reopektik davranış	$\epsilon_{büzülme}$: Büzülme kaynaklı birim şekil değişimi
N: Newtonyen davranış	$\sigma_{parazit}$: Parazit çekme gerilmeleri
HB: Herschel Bulkley modeli	$\epsilon_{sıcaklık}$: Sıcaklık değişiminden meydana gelen birim şekil değişimi
EVA: Etilen vinil asetat	$E_{kompozit}$: Kompozitin elastisite modülü
$\dot{\gamma}$: deformasyon hızı (shear rate)	$\sigma_{gevseme}$: Kısıtlı durumda gevşeme nedeniyle gerilmedeki azalma
τ : kayma gerilmesi (shear stress)	σ_{ϵ} : Çekme dayanımı
η : anlık viskozite (viscosity)	σ : Köprüleme gerilmesi
F: Laminer akışta kayma kuvveti	δ : Çatlak genişliği
A: Laminer akışta kayma kuvveti etki alanı	σ_{fc} : İlk çatlak dayanımı
v : Laminer akışta hareketli plaka hızı	
H: Kayma gerilmesinin oluştuğu açıklığın kalınlığı	
m: Power kanuna uyan sıvılar için kıvam katsayısı	
n: Power kanuna uyan sıvılar için üs katsayısı	
τ_o : Eşik kayma gerilmesi	

σ_0 : En büyük köprüleme gerilmesi
 K_m : Matris tokluğu
 σ_{ss} : Kararlı çatlak gerilmesi
 δ_{ss} : Kararlı çatlak açıklığı
 J_T : Toplam enerji
 J_ς : Çatlağın sönümlendiği enerji
 J_{tip} : Liflerin köprüleme yoluyla matrise aktaracağı enerji
 E_m : Matris elastisite modülü
 J_b : Liflerin köprüleme yoluyla matrise aktarabileceği en fazla enerji
 V_f : Lif dozajı
 d_f : Lif çapı
 L_f : Lif uzunluğu
 E_f : Lif elastisite modülü
 β_o : Lif-matris arayüzey sürtünme katsayısı
 G_d : Kimyasal aderans
 $V_{kimyasal\ büzülme}$: Kimyasal büzülme kaynaklı hacim azalması
 $\bar{I}$: İncelik indeksi
 i : İncelik indeksi formülünde tane boyutu
 A_i : İncelik indeksi formülünde i boyutlu tanenin yüzey alanı
 V_i : İncelik indeksi formülünde i boyutlu tanenin hacmi
 p_i : İncelik indeksi formülünde i boyutlu tane hacminin toplam hacme oranı
 Γ : Videolu yayılma karakterizasyonunda bağıl yayılma oranı
 Γ_{30} : 30. saniyede anlık bağıl yayılma oranı
 Γ_n : Nihai bağıl yayılma oranı
 Γ'_{30} : 30. saniyede anlık bağıl yayılma oranı (5 dakika gecikmeli deneyden elde edilen)
 Γ'_n : Nihai bağıl yayılma oranı

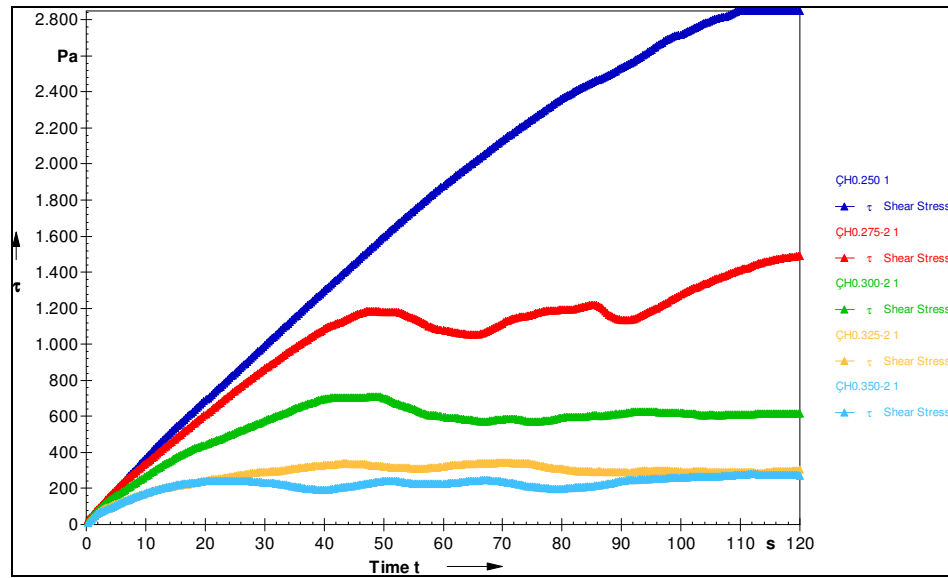
(5 dakika gecikmeli deneyden elde edilen)
 d_0 : Videolu yayılma deneyinde başlangıç yayılma çapı
 d_1, d_2 : Videolu yayılma deneyinde ölçülen en dar ve en geniş yayılma çapları
 $\tau_{o,statik}$: Düşük deformasyon hızında statik eşik kayma gerilmesi
 $\tau_{o,statik,maks}$: Düşük deformasyon hızında ölçülen en yüksek statik eşik kayma gerilmesi
 $\tau_{o,statik,min}$: Düşük deformasyon hızında ölçülen en düşük statik eşik kayma gerilmesi
 η_{basl} : Başlangıç viskozitesi
 $\tau_{o,dinamik}$: Dinamik eşik kayma gerilmesi
 η_{inf} : Nihai viskozite
 μ : Plastik viskozite
 $A_{histeresiz}$: Akma eğrileri arasında kalan histeresiz alanı
 $A_{i,çıkış}$: Çıkış akma eğrisi altında kalan alan
 $A_{i,iniş}$: İniş akma eğrisi altında kalan alan
 P : Eğilme yükü
 δ : Eğilme yükü altında açıklık ortası sehimi
 x_i, y_i : Boncuk yönteminde başlangıç boncuk merkezi koordinatları
 x'_i, y'_i : Boncuk yönteminde iki gün sonraki boncuk merkezi koordinatları
 L : Boncuklar arası mesafe
 O_i : Otojen büzülme
 K_i : Nem kaybından kaynaklanan büzülme

EK-B

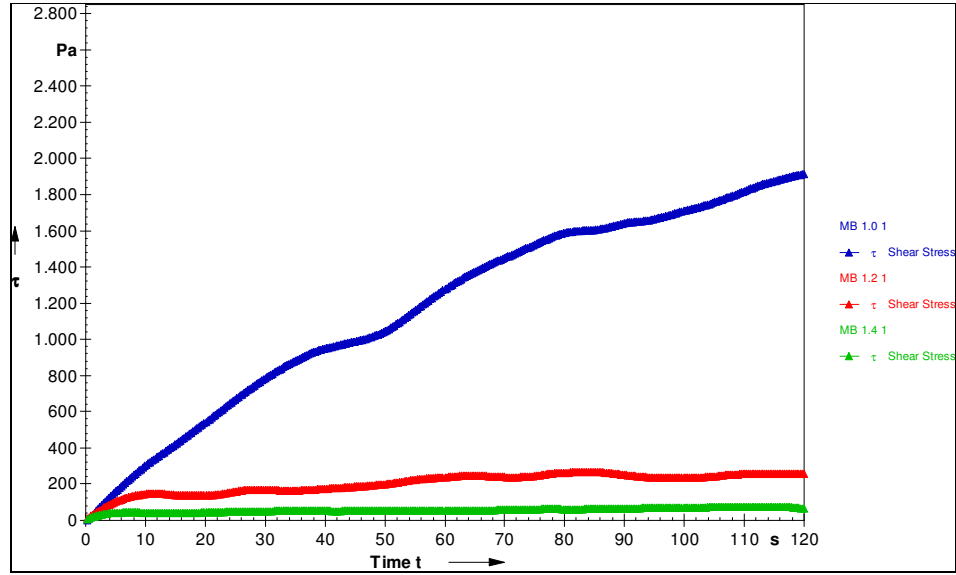
Statik EKG değerlerinin belirlendiği, $0,1 \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızındaki kayma gerilmesi – zaman grafikleri (Bölüm 3)



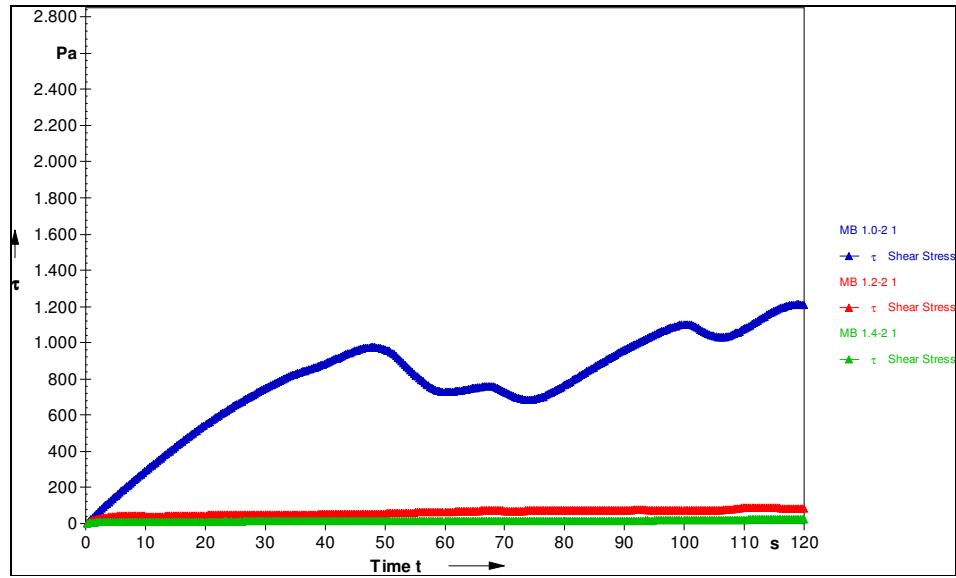
ÇH serisi



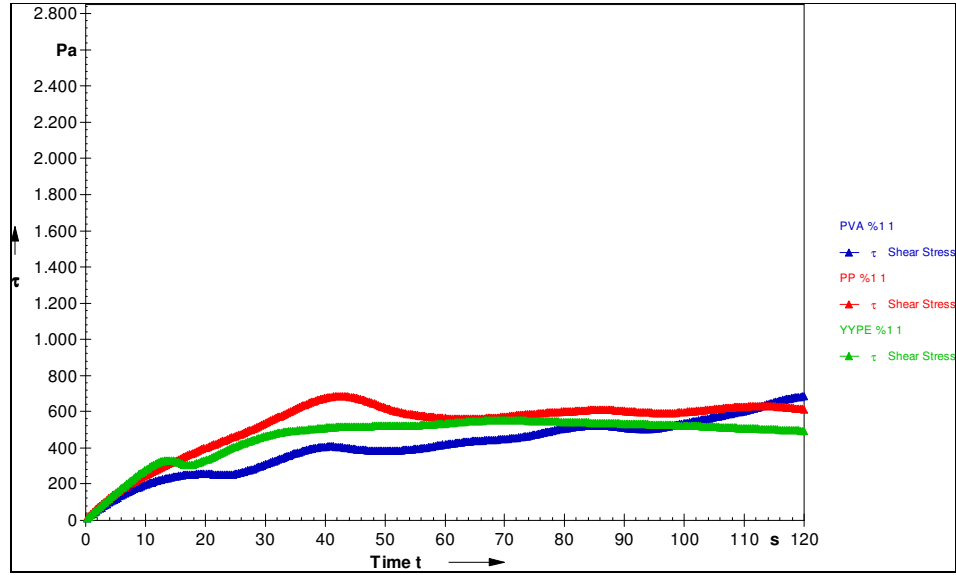
ÇH serisi (tekrar karıştırma sonrası)



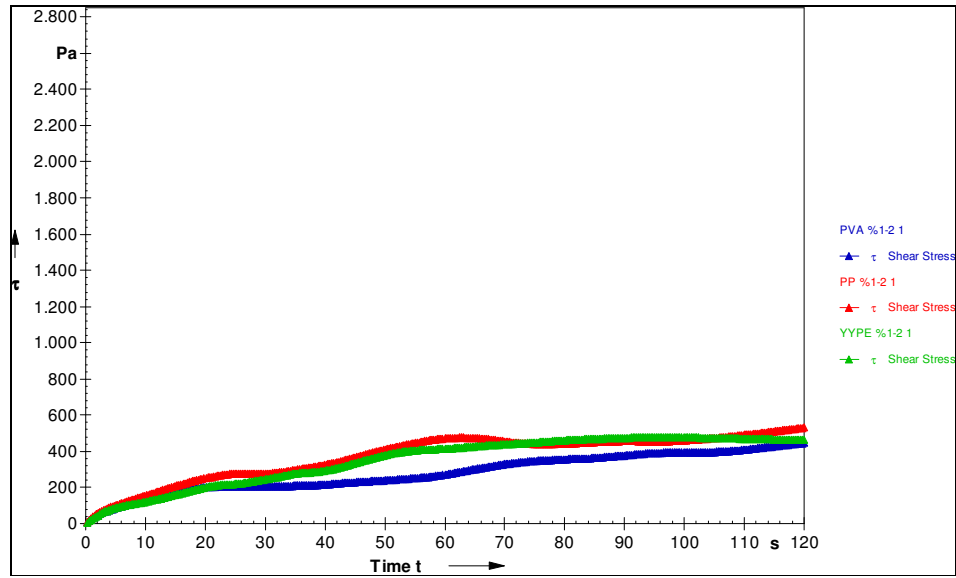
MB serisi



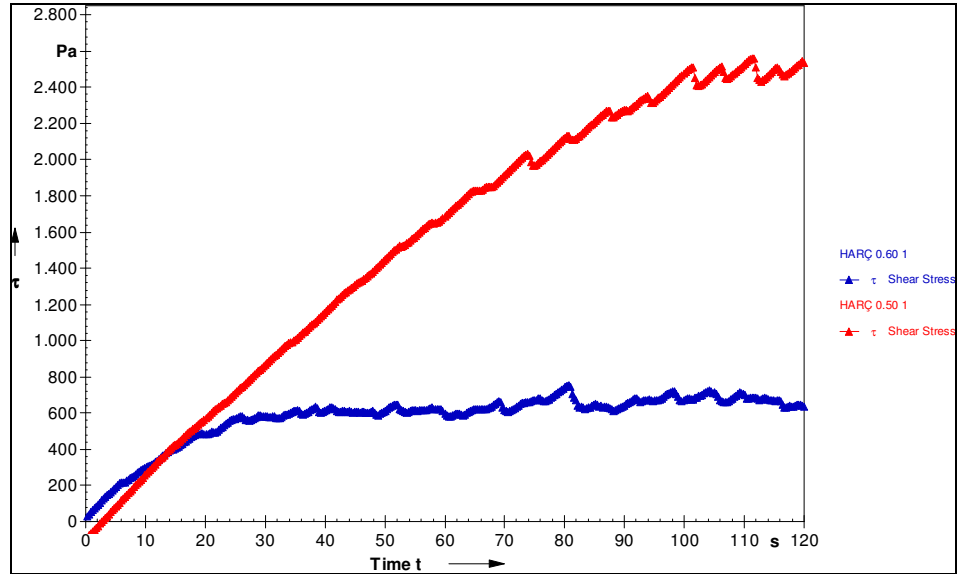
MB serisi (tekrar karıştırma sonrası)



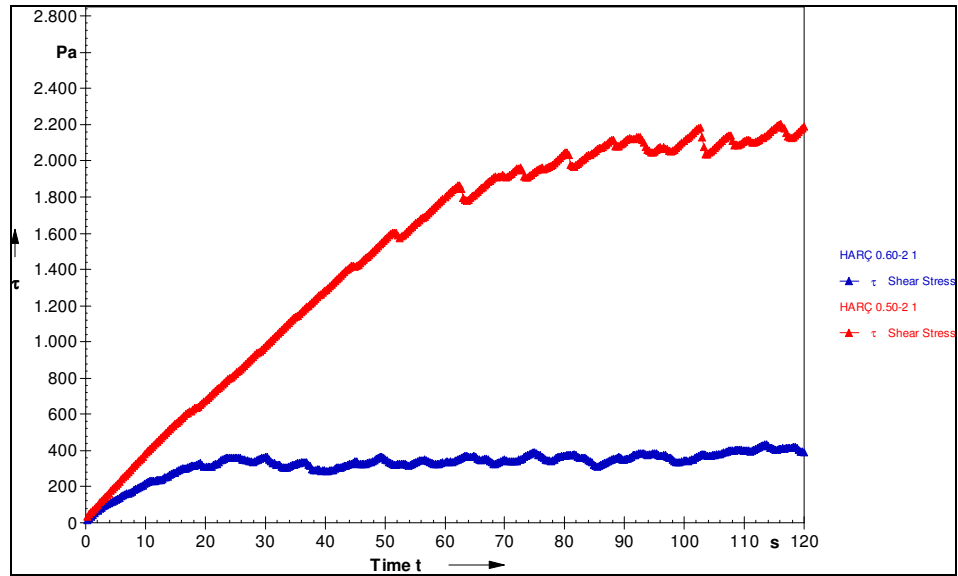
Lifli MB serisi



Lifli MB serisi (tekrar karıştırma sonrası)



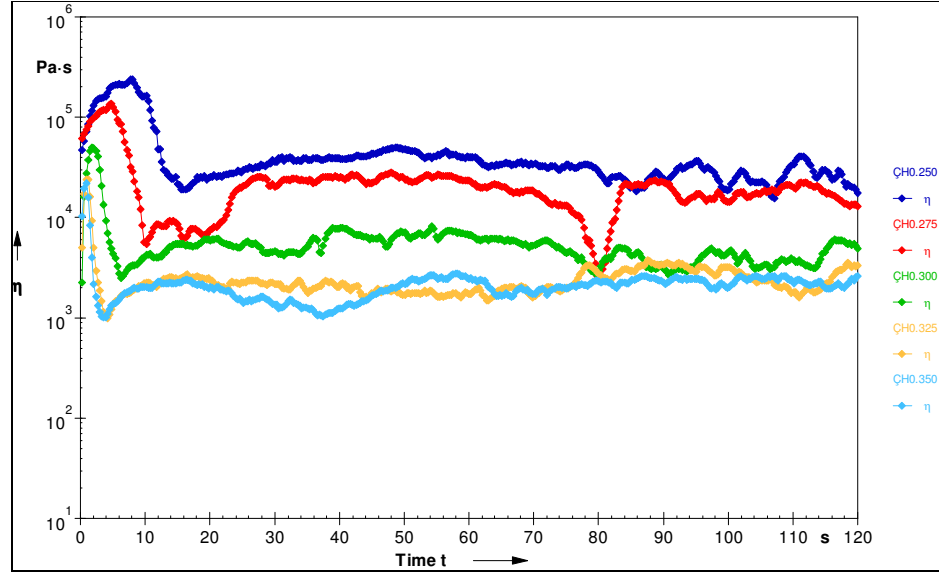
Çimento harcı serisi



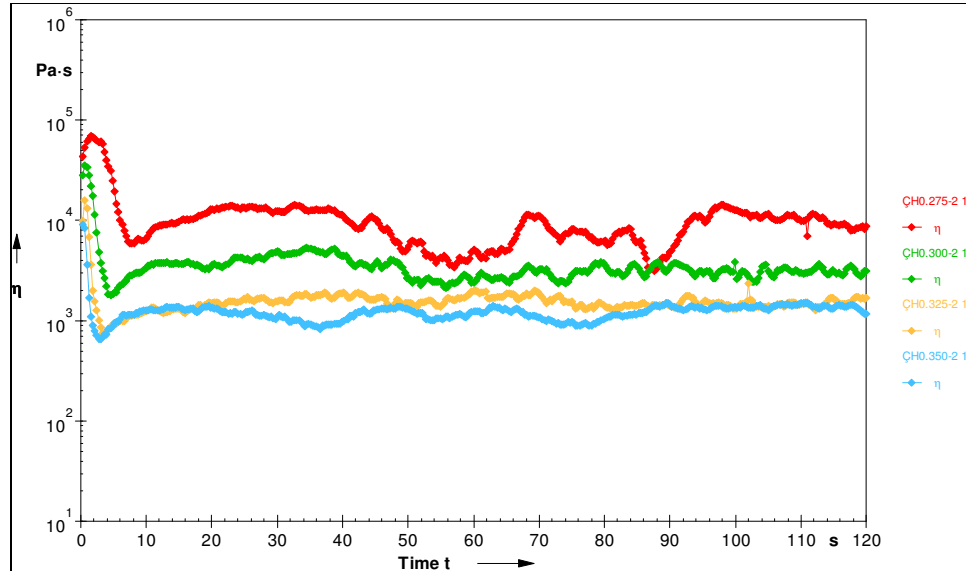
Çimento harcı serisi (tekrar karıştırma sonrası)

EK-C

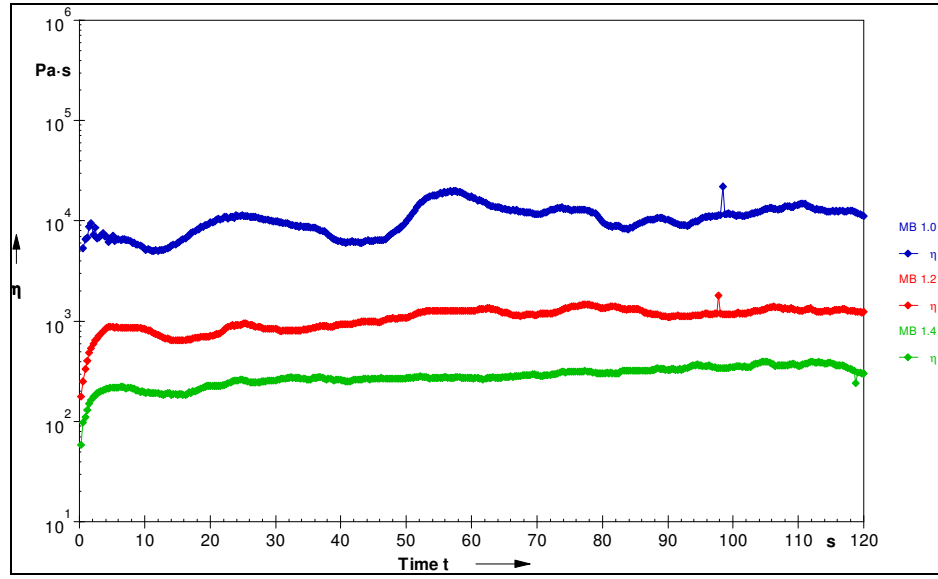
Başlangıç viskozitesi değerlerinin belirlendiği, $0,1 \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızındaki viskozite – zaman grafikleri (Bölüm 3)



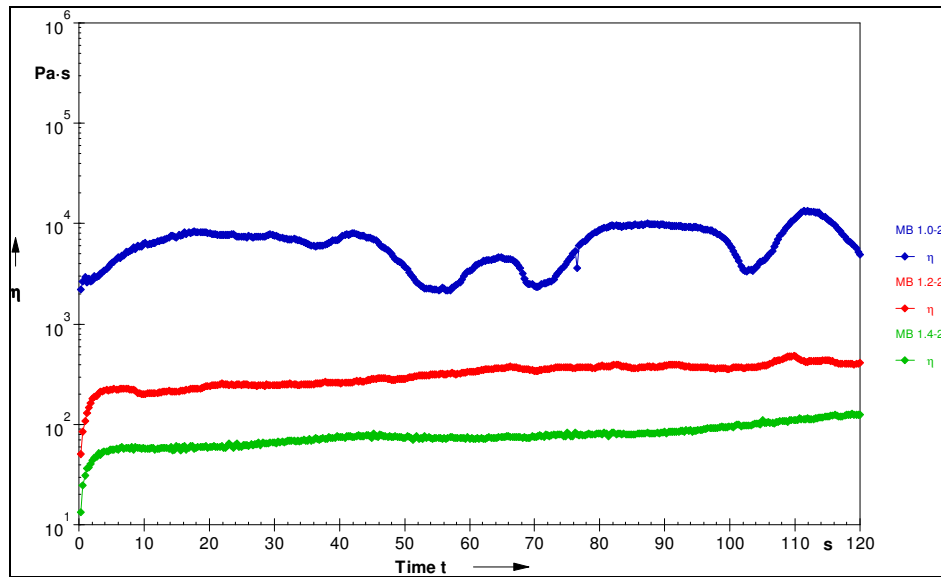
ÇH serisi



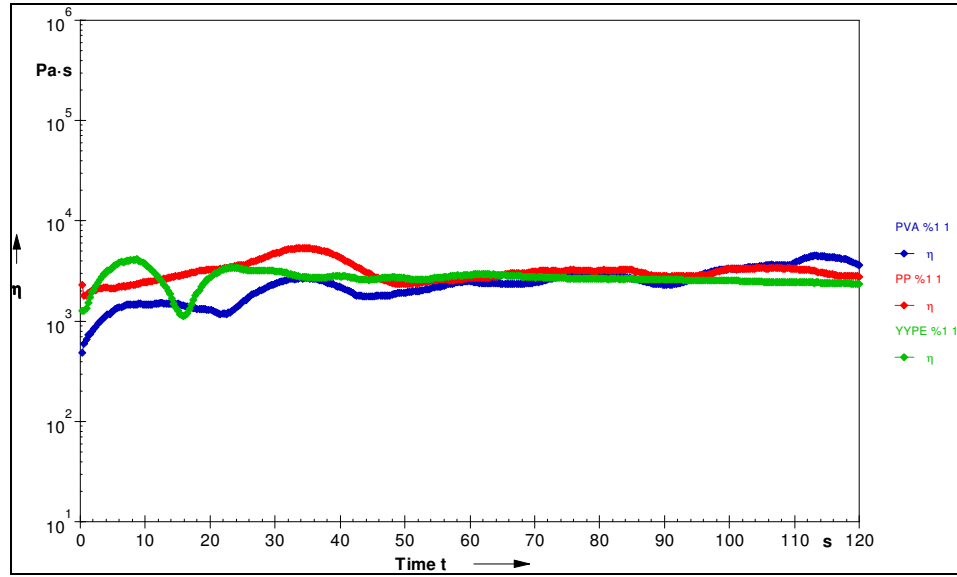
ÇH serisi (tekrar karıştırma sonrası)



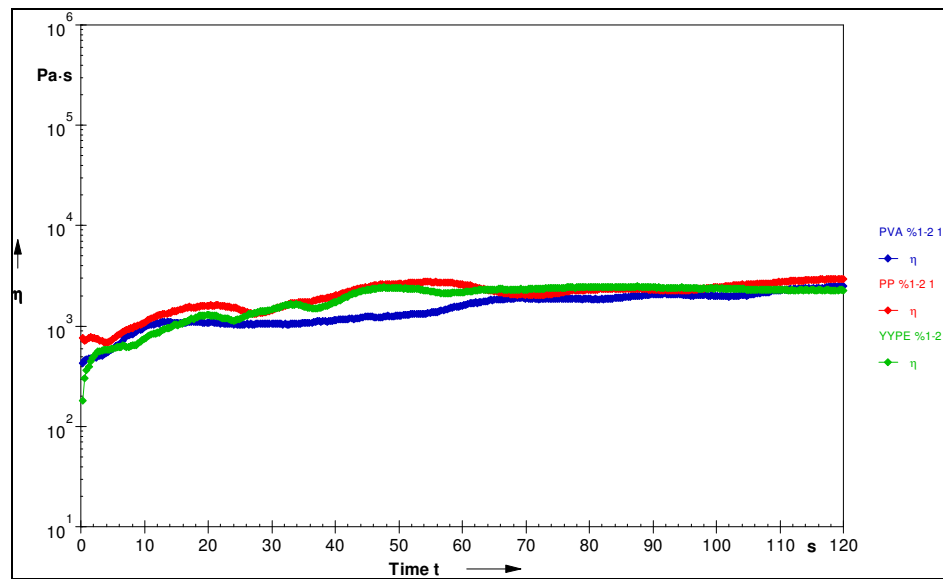
MB serisi



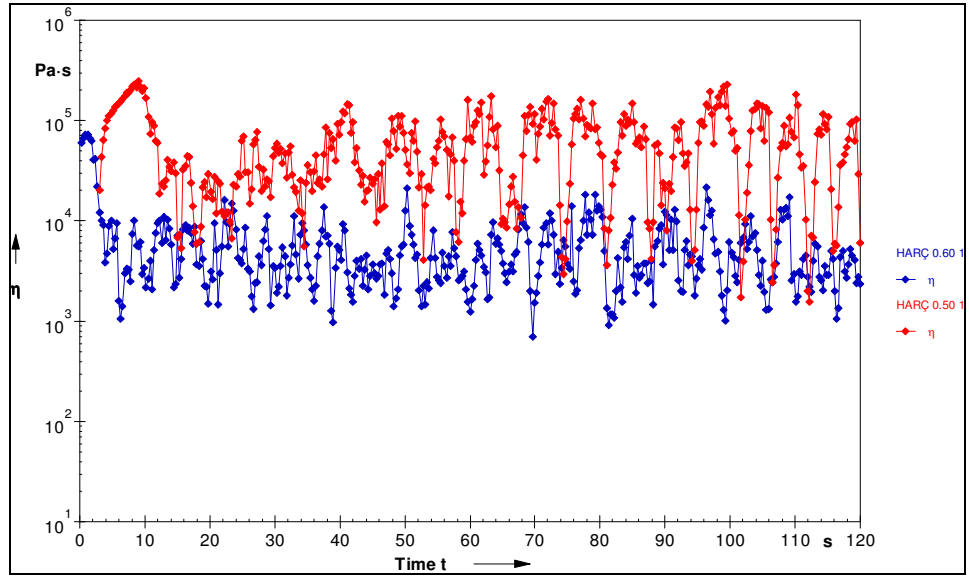
MB serisi (tekrar karıştırma sonrası)



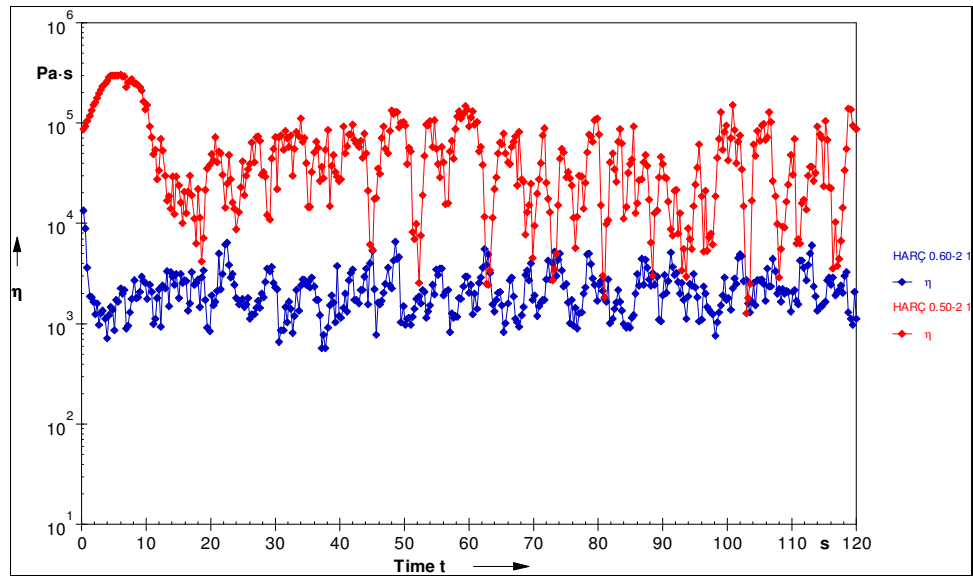
Lifli MB serisi



Lifli MB serisi (tekrar karıştırma sonrası)



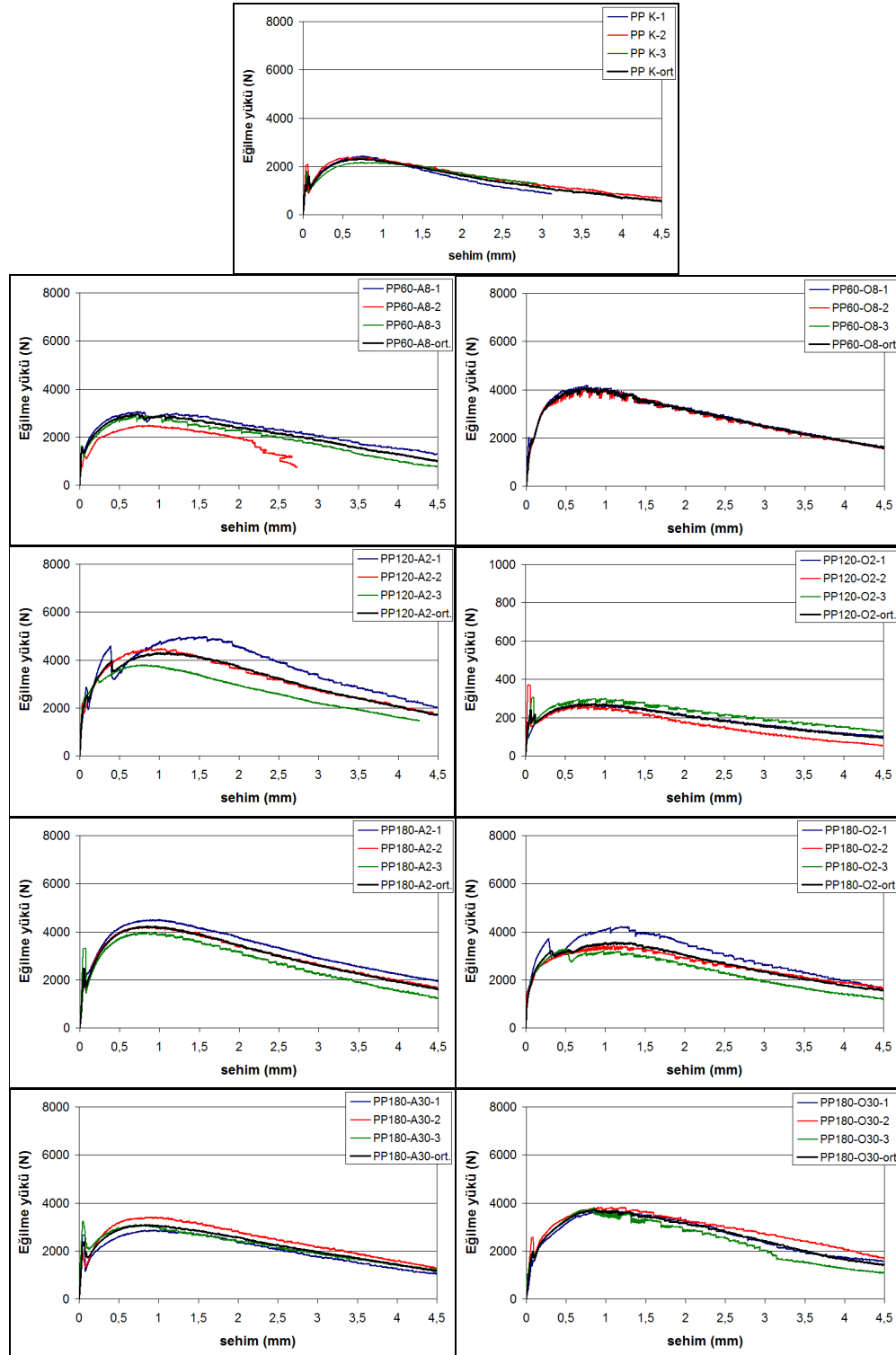
HARÇ serisi



HARÇ serisi (tekrar karıştırma sonrası)

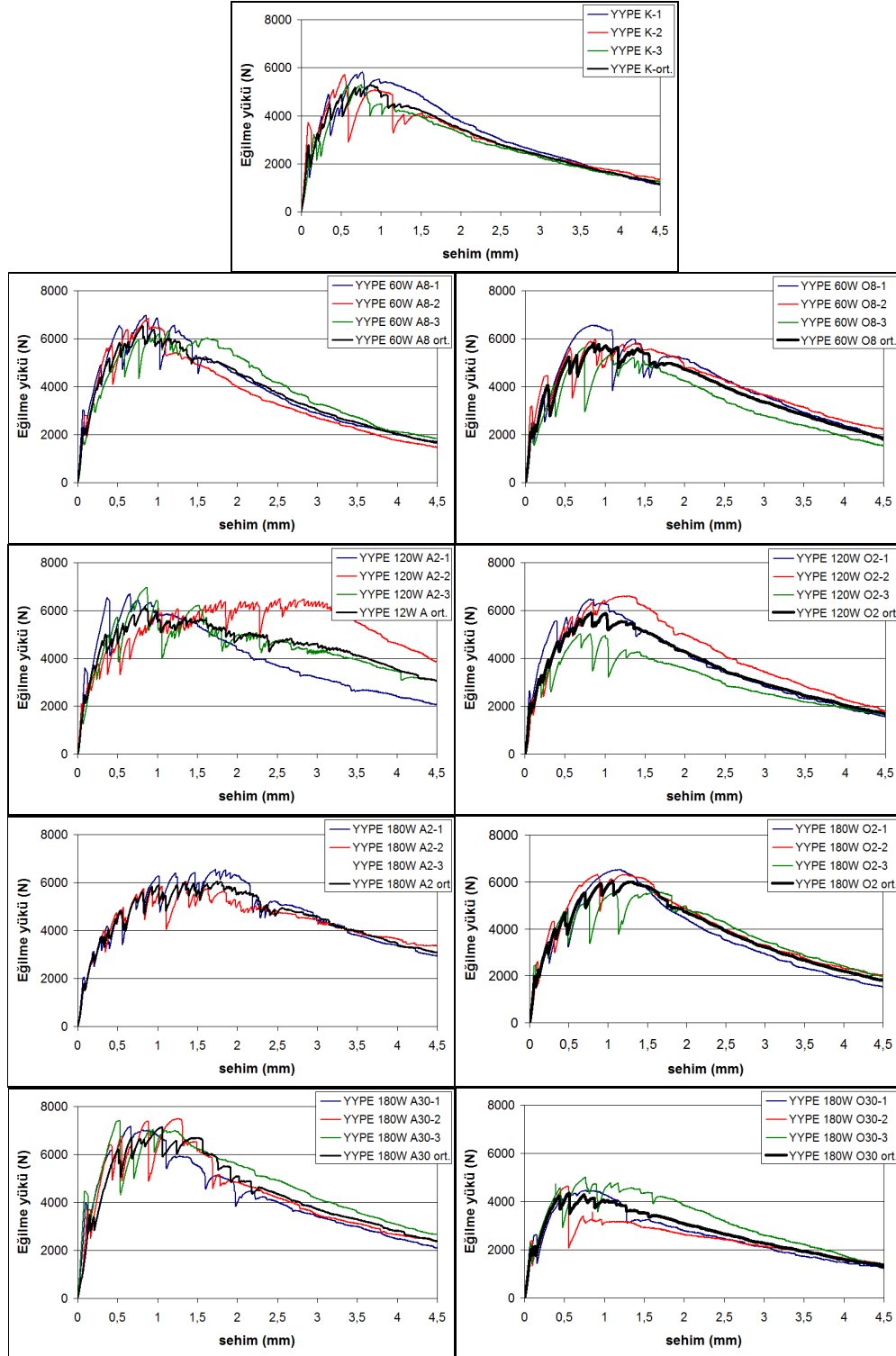
EK-D

Argon ve oksijen plazması uygulanmış PP lifli kompozitlerin yük-sehim grafikleri
(Bölüm 4)



EK-E

Argon ve oksijen plazması uygulanmış %1 YYPE lifli kompozitlerin yük-sehim grafikleri (Bölüm 4)



EK-F

Argon ve oksijen plazması uygulanması sonrasında yağlanmış %2 PVA lifli kompozitlerin yük-sehim grafikleri (Bölüm 4)

